



討 論

「山陰の温泉とその地質構造」再考

西 村 進<sup>1)</sup>

(平成 28 年 9 月 20 日受付, 平成 28 年 9 月 26 日受理)

Discussions on the Generation of Hot Springs and Their Geological Structure in Sanin District, Japan

Susumu NISHIMURA<sup>1)</sup>

Abstract

Hot Springs are distributed along the Japan Sea coast in Sanin District. Philippine Sea Plate has been subducted to the north into the 70-80 km depth from the Nankai Trough, and to the northwest into more than 250 km depth from the valley along Masuda-Tsuwano-Yamaguchi. On the other hand, the Pacific Sea Plate are subducted into 670 km depth from the Japan Deep. Under the Oki Island, the depth of the Pacific Sea Plate is about 380 km depth and also under Izumo about 430 km depth. The velocity of earthquake wave in these depths are abruptly change and it means that some dehydration are occurred in these depths. These part of upper mantle maybe partial melting and making a alkaline basaltic series magma. These melt introduce into deep vertical faults along east to west in the northern cost of Japan Sea. These faults are occurred at the time of rotation of the western part of S.W. Japan Island.

Key words : volcanic belt, volcanic front, monogenetic volcano of alkaline basalt series : Philippine Sea Plate: Pacific Sea Plate

要 旨

山陰の日本海海岸沿いには高温の温泉が点在している。山陰ではフィリピン海プレートの北方への沈み込みが深発地震の震源分布の 70~80 km 深度までたどれる。このプレートで発生する深発地震の分布から、益田―津和野―山口の谷間で西西北方向に急傾斜でフィリピン海プレートが沈み込んでいると推定できる。また一方で、東北地方の日本海溝で沈み込んでいる太平洋プレートは隠岐の島のあたりでは 380 km 深度、出雲の沖では 430 km の深度で西方に沈み込んでいると推定できる。この深度ではマンツルの地震波速度が急に変わることが観測されていて、この部分でスラブからの脱水があると考えられる。このことから山陰地方の地表でみられるアルカリ玄武岩系の単成火山活動は太平洋プレートの沈み込みに関連すると推定できる。

<sup>1)</sup>特定非営利活動法人シンクタンク京都自然史研究所 〒606-8305 京都市左京区吉田河原町 14, 近畿地方発明センター内。 <sup>2)</sup>NPO Think-tank Kyoto Institute of Natural History, Kink-Chiho Hatsumei Center, Yoshida-Kawaramachi 14, Sakyou-ku, Kyoto 606-8305, Japan.

マグマが地表に火山活動で噴出するためにはその通路の考察が必要であるが、日本海側の基盤岩の組み合わせや岩質や地質構造、並びに被害地震の分布からはほぼ東西方向の大きな断層が推定できる。これは西南日本島弧が大陸から離れ、時計周りに回転したことによる結果と考えられる。

キーワード：火山の帯状分布、火山フロント、アルカリ玄武岩系単成火山、フィリピン海プレート、太平洋プレート

## 1. はじめに

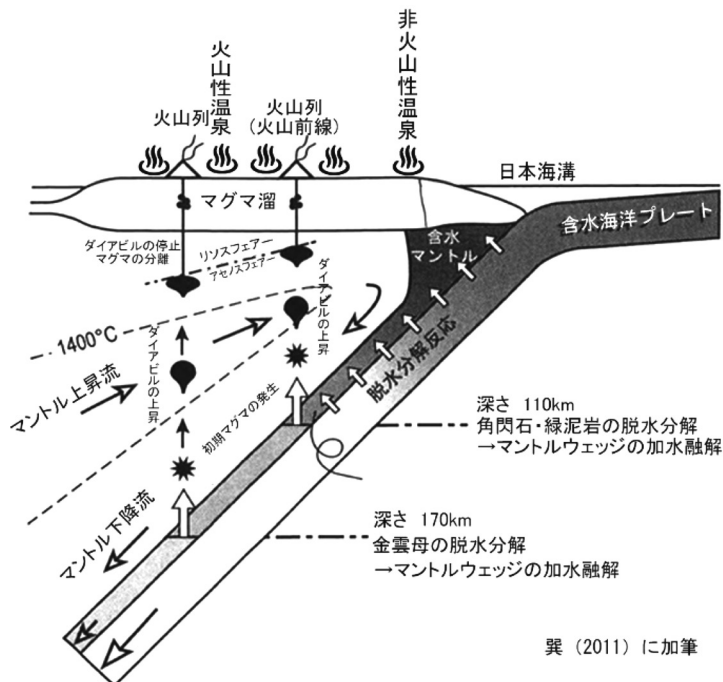
平成 26 (2014) 年 9 月三朝温泉にて日本温泉科学会第 67 回大会が開催された。そのために、温泉科学誌第 64 巻第 1 号に特集「山陰の温泉」が生まれ、「山陰の温泉とその地質構造」をまとめた(西村, 2014)。エクスカージョンの案内を兼ねて、鳥取・島根両県の温泉の分布と地質の解説を試みた。幸いして同じ号に北岡ほか (2014)「山陰地方における花崗岩割れ目系の深部水循環による高温温泉水の形成」がまとめられ、特に掘削井の温度勾配に重点を置いてまとめられた論文や、西田良平 (2014a)「山陰地方の地震活動と温泉観測」の解説が掲載された。さらに、第 67 回大会の公開講演「地震活動と温泉の温度変化の関係」(西田, 2014b)；「西南日本における温泉水の成因について：スラブ起源深部流体の特徴と分布」(風早, 2014)；「原子力機構人形峠環境技術センターと三朝ラドン効果研究」(石森, 2014) が論じられ、山陰の地殻深部の構造と温泉についての討論ができる問題点などが明確になった。これらの論文をもとに、地殻や上部マントル内の流体の動きに討論が進むことができた。今後さらなる議論をしていただければ幸いである。

## 2. 温泉の分類

今までわが国での温泉学は温泉ありきから始まっていることが多いが、ここではどうしてあるのかを問題として取り扱うことになる。まず温泉の分類をまとめておこう。

我が国の温泉はその産出の仕方から第 1 図に示すように分類されることが多い。まず火山性温泉と非火山性温泉に分けられるが、非火山性温泉であって地下の温度勾配を利用して、堆積物に深く掘削して汲み出されている温泉があるが今回はこのような温泉は議論の対象としない。それを除くと、我が国の温泉は変動帯に湧出している。我が国の主な火山活動は太平洋プレートとフィリピン海プレートがそれぞれ日本海溝や南海トラフに沈み込む場でみられる。沈み込むスラブは周辺よりも冷たく重いものである。これらの存在は深発地震の震源分布から推定される。しかし、地震波の伝達の解析から、島弧の地殻下部や上部マントルに常にはマグマ溜りのような流体の溜りは見つからず、時々生じることが判っている。これは主にスラブからの脱水が地殻下部から上昇する場合や、含水鉱物や岩石から脱水し周辺の岩石の融点を下げ部分溶融してマグマを生じるときにみられると推定できる(第 2 図)。その部分溶融により生じた流体は周辺より比重が小さいのとマントルや地殻下部に存在する二酸化炭素を多く含み、上昇しマグマ溜りなどを生じて、地殻のクラックの多い部分を通じてさらに上昇し、噴火活動を起こす。これらのマグマは上昇するに従いまたはマグマ溜りの中で、主として冷却により鉱物が晶出し残りのマグマの成分は変化する。その変化の仕方の研究は、1940 年代の Bowen の火成岩成因論の導入による研究(たとえば久野, 1954 ; Kuno, 1960)により進んだ。一方、日本海溝の重力測定をもとにした日本列島近傍の重力異常の研究(Kumagai, 1940)や、東北地方の地震観測(たとえば宇津, 1977)などをもとにして、その後のプレートテクトニクスの提唱になり、現在に至っている。





巽 (2011) に加筆

第 2 図 東北日本の沈み込み帯における巽モデル (2011) と温泉

中央海嶺で生まれた玄武岩質の海洋地殻が日本海溝で日本島弧の下に沈み込むモデル。海嶺で生まれ海溝で沈み込むまでの海水に長く触れ、玄武岩質岩石は蛇紋岩になり、このプレートが海溝で沈み込み 30~80 km の深度になるとその深さの静水圧と地温勾配による温度により蛇紋岩は脱水して、超臨界「水」流体となり周りの成分や二酸化炭素を溶かし込み上昇し、伏流水に薄められ化学成分を多量に含んだ非火山性の温泉が湧出する。

深さ 110 km に達すると角閃石・緑泥石が脱水分解し、マントルウェッジの加水融解しソレイイト系列のマグマが生じ噴火活動が起こる火山帯（東北では那須火山帯）が生ずる。170 km の深度では金雲母の脱水分解をし、マントルウェッジの部分溶融し、高アルカリソレイイト系列のマグマが生じ火山帯が生じる（東北では島海火山帯）この火山帯は那須火山帯よりも活動が少ない。那須火山帯の太平洋側は連続性の良い境界が存在し、その境界を火山フロントと名付けられる。

橄欖岩の鉱物相の相間に「水」を含んでいることが最近分かり、含水マントルをこのモデルでは示している。

ことを示した (Nishimura and Ikeda, 1978 ; 第 5 図)。

東北地方の海溝軸に鉛直な面に 1973~2004 年に観測された震源分布を投影すると第 6 図に示すように那須火山帯は 110 km 深度の上部であり、170 km 深度の上部には島海火山帯がある。Tatsumi (1989), 巽 (2011) によると、それぞれの深度は角閃石・緑泥石の脱水分解の圧、金雲母の脱水の圧 (深度) に当たる。第 4 図では各岩系のトレンドが交差することがあるように、そのように単純に説明できるだろうかとこの疑問も多い (たとえば高橋, 2000)。

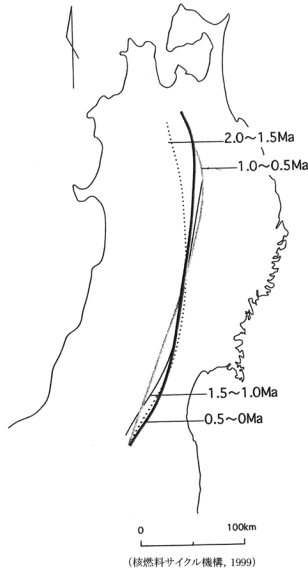
マグマが上昇するとき、その経路の地殻が厚い場合は、通路の周辺の岩石の汚染が考えられる。非常にこの汚染の受けにくい一つの例を挙げよう。インドネシアのスラベシ島の北東端メナドから北上して点々と続くサンギへ火山弧の Sr<sup>87</sup>/Sr<sup>86</sup>。比の測定結果 (Whitford, 1975) をみよう。サンギへ火山弧はほとんど地殻の存在が認められなく、その汚染を受けていない火山活動 (第 7 図) なので、深発地震の分布 (Cardwell *et al.*, 1980) と顕鏡の結果をまとめた結果、地殻物質の汚染のない

第1表 各岩系とその主要造岩鉱物 昔の火山岩の研究は光学顕微鏡, 化学分析, などで研究がすすめられた. 我々も多くの薄片観察や, 湿式分析, 放射化分析をして各火山帯の分類を行った (Nishimura, 1980).

Essential mineral composition of the volcanic rocks.

Rock series	T [C <sub>T</sub> ]	H [C <sub>H</sub> ]	A [C <sub>A</sub> ]
Pheno-cryst	Anorthite* - bytownite Olivine with pyroxene rim Augite, rarely pigeonite in T Hypersthene Magnetite (* sometimes large pheno-cryst > 1 cm in size)	Bytownite - labradorite Olivine Augite Hypersthene Magnetite [Hornblende]	Labradorite - andesine Olivine Augite, Ti-augite in A Magnetite [Hypersthene] [Hornblende] [Biotite]
Ground-mass	Bytownite - labradorite Augite, pigeonite in T Olivine (rare) usually with reaction rim Silica minerals Magnetite [Hypersthene] [Alkali feldspar]	Labradorite - andesine Augite Olivine (rare) with or without reaction in rim H Silica minerals Alkali feldspar Magnetite [Hypersthene]	Andesine - oligoclase Augite Olivine without reaction rim in A Alkali feldspar Magnetite Apatite [Hypersthene] [Silica minerals]

[ ] included only in calc-alkali rocks.



第3図 東北日本における各時代の火山フロント (核燃料サイクル機構, 1999)

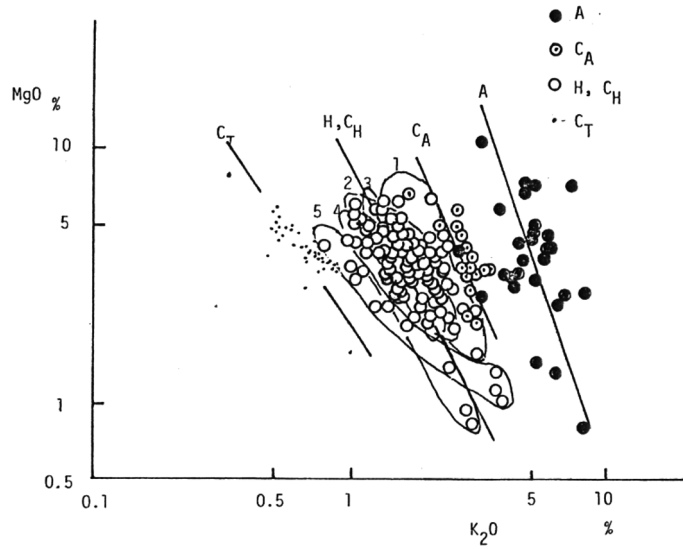
火山フロントの2.0~1.5 Ma, 1.5~1.0 Ma, 1.0~0.5 Ma, 0.5~0 Maの火山フロントの位置はほとんど変わらない.

とき, 2列の火山帯が明瞭に存在することがよく理解できた (第8図; 第9図; Nishimura, 1997). これらのことから, 異モデルが成立している.

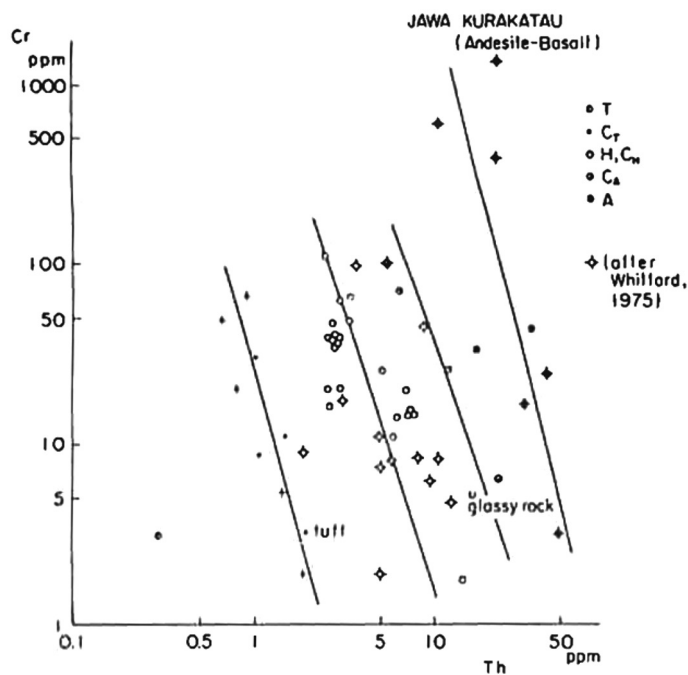
#### 4. 山陰 (丹後半島から大山まで) の火山活動

海嶺で生じた玄武岩のプレートが海水と反応して蛇紋岩化し, 海溝やトラフでそれぞれ沈み込み, そのスラブが50 km~100 km 深度で蛇紋岩から脱水し, 橄欖岩になる. この脱水ではその上部のマントルや下部地殻は溶融することなく, 超臨界「水」流体が上昇する. この「H<sub>2</sub>O」は超臨界状態で周辺の二酸化炭素を含み, 周辺より比重が低いのでさらに上昇する. マントルの最上部を通過しさらに地殻内を上昇し, 直下型地震が発生する断層 (震源分布をみると12 km 以浅) に沿い上昇する. さらに地表に近づき地下水に薄められ熱水・高温の温泉水となる.

山陰でのフィリピン海プレートの沈み込みの先端は70~80 km 深度までしか感知できない (第10図; 弘瀬ほか, 2007). しかるに山陰では日本海の海岸線にほぼ平行に第四紀のアルカリ玄武岩系の単成火山活動が丹後半島の玄武洞から点々と大山



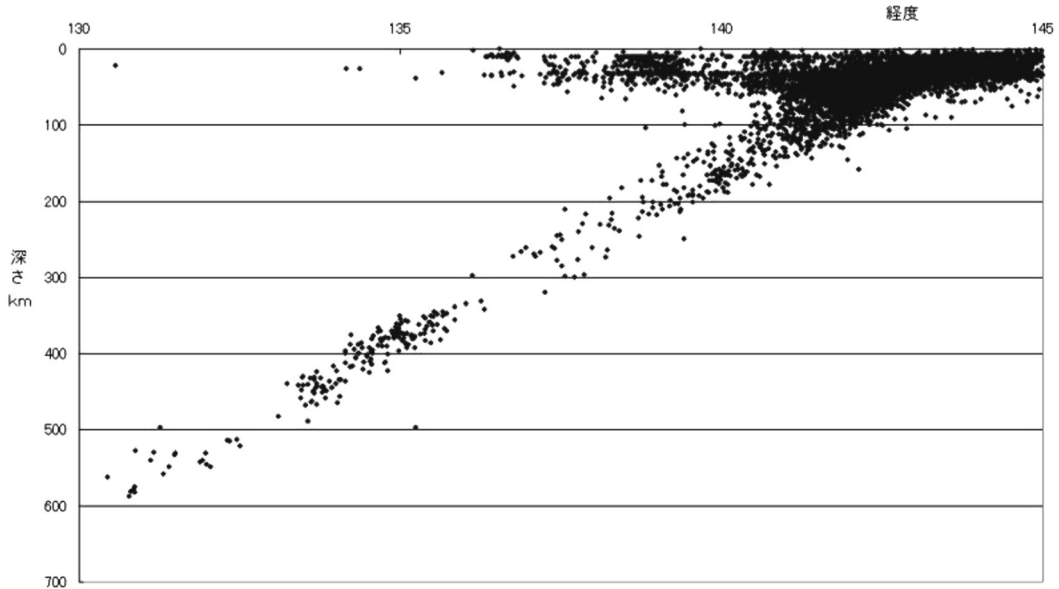
第 4 図 ジャワ島での、検鏡で火山岩の三岩系で分けた火山岩と化学分析による  $K_2O$  と  $MgO$  の関係



第 5 図 ジャワ島での、検鏡で火山岩の岩系で分けた火山岩と放射化分析による  $Th$  と  $Cr$  の関係

に至るまでみられる (西村, 2001) (第 11 図; 風早, 2014 に加筆)。

このことから島根県益田から玄武洞の単成火山の南側に火山フロントを引く研究者がいるがこの考えは火山フロントの定義からみて正しくない。火山フロントの定義は、海溝やトラフで沈み込ん



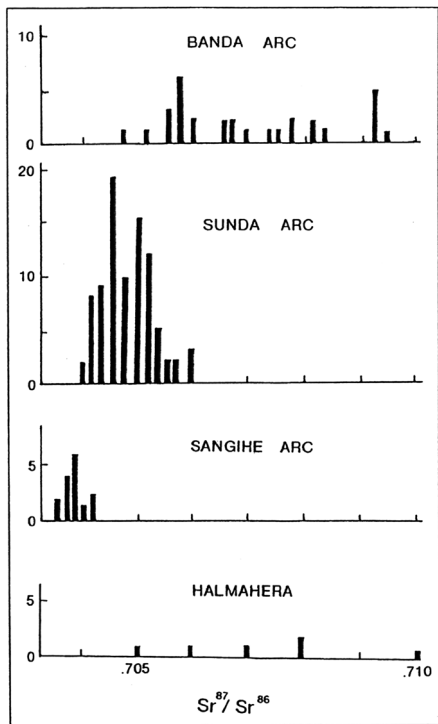
第6図 東北地方の太平洋プレートの沈み込みの状態を推察するために1979-2004年の間に発生した地震を一つの東西断面に投影した震源分布図。これを見ると直下型地震は20 km以浅に分布し、深発地震の分布は144°Eから130°Eまでの間では、ほぼ一定の傾斜で一定に起こっている。地震は経度130°Eから133°Eの間に多く発生している。

だスラブが沈み込み110 km深度に達すると角閃石・緑泥石が分解脱水し、さらに170 km深度に至ると金雲母が分解して脱水し、それぞれ上部のマントルの構成鉱物の溶融点を下げ上部のマントルが部分溶融をしてソレイアイト玄武岩系、高アルミナソレイアイト玄武岩系の二列の帯状に並ぶ噴火活動をおこす。その時に噴火活動帯の外帯の境が火山フロントと定義されているのである。山陰では、ソレイアイト玄武岩系の火山活動ではなく、アルカリ玄武岩系の単成火山が日本海の海岸線にはほぼ平行に並び、その境は地質境界で非常に大きな横ずれの東西性の断層があると推定される。

沈み込みのスラブが200 km深度以深の上部にアルカリ玄武岩系の火山活動がみられる。さらにそれ以深では橄欖岩の岩相の変化ごと脱水して、その上部でアルカリ玄武岩系マグマを作る。その深度が深くなるほど上昇するマグマが上がりにくくなり、ほぼ10万年程度活動する単成火山を生じる。山陰の日本海側丹後半島から大山あたりまでの火山活動がこれにあたる。詳細な議論はここではしないが、一つの示唆を示しておく。東北地方の震源分布の断面(1973-2004年)(第6図)からみられる340-500 kmの少し多い震源分布と地球内部と地球内部の重要な結晶の地震波速度の関係を鳥海(2008)によって議論されているが400~600 km深度で橄欖石の結晶構造が変わることを示している。この時に結晶間に取り込まれている「水」が出てくることを示唆している。この上部の地表がこれらの単成火山の分布場所にあたる(第12図)。

京都府の北部丹後半島から大山に至る単成火山に伴う温泉について考察しよう。

弘瀬ほか(2007)の解析によるフィリピン海プレートの南海トラフに沈み込みスラブの深度図を第10図に示す。フィリピン海プレートは太平洋プレートに比べ若く、太平洋プレートにくらべて温度が高く変形を受けやすい。さらに、日本海の生まれた17~14 Maのテクトニックな動きの影響もあり、藤田(1983)の提唱する約100万年前からほぼ数万年前までの六甲変動の上下変動の影響や5 Maに始まる伊豆マリアナ弧の東北日本弧への衝突の影響も考慮する必要がある(新妻、

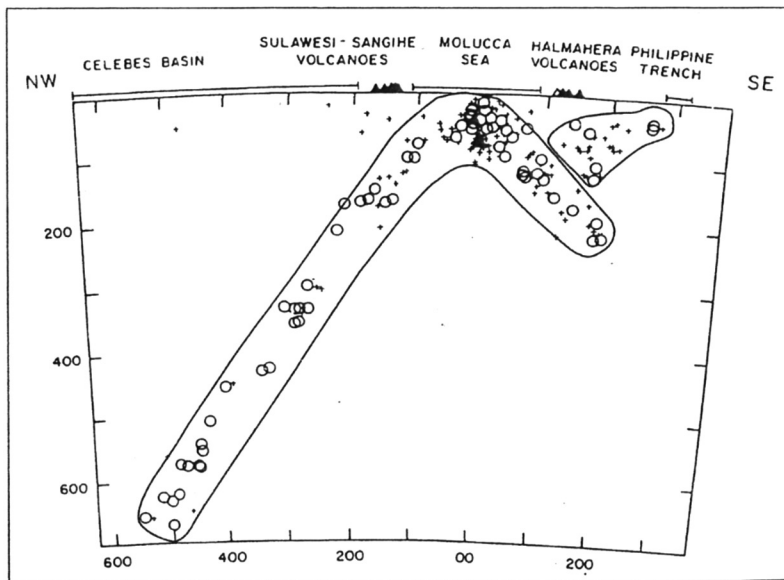


第 7 図 インドネシアの火山弧の  $Sr^{87}/Sr^{86}$  の違い  
 バンダ弧・スンダ弧・ハルマヘラの火山岩とサンギヘ弧  
 との火山岩の  $Sr^{87}/Sr^{86}$  比が非常に違い、サンギヘ弧のマ  
 グマへの地殻岩石の汚染がきわめて少ないことがわかる。

2006). それらにかかわる温泉についての議論は機会があれば討論したい。

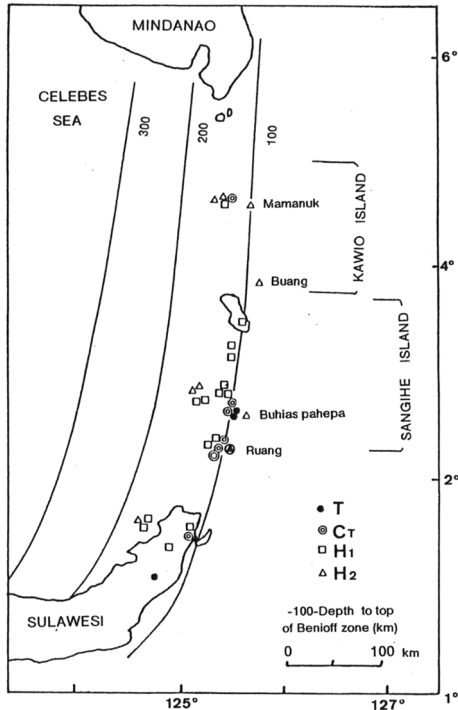
中国地方の日本海側の単成火山はすべてアルカリ玄武岩系の噴火であり(西村, 2001), マグマの生成は太平洋プレートの 400~600 km 深度での橄欖岩の岩相変化の際の脱水によるマンツルの部分溶融の結果と説明できる. これらの点から東北地方で定義された火山フロントは山陰地方の日本海側では存在しないと結論づけられる.

山陰地方の丹後半島から大山までのアルカリ玄武岩系の火山岩の噴出は扇ノ山火山 [12 万年~4.5 万年の活動] (Furuyama, *et al.*, 1993), 千種火山 [第四紀前半], 玄武洞 [1.75~1.53 Ma] (先山ほか, 1995), 神鍋火山群 [22000~25000 年前], 田倉山火山 [0.37~0.30 Ma の活動], 上佐野火山 [玄武洞火山より若く, 神鍋山より古い活動] とされ, どの山も数万年程度の活動である. 西端の大山も更新世のアルカリ玄武岩・安山岩の活動である. これらの基盤をなす新第三紀の玄武岩の活動が各所で広くみられる. これらのアルカリ玄武岩系の単成火山活動の



第 8 図 サンギヘ弧にはほぼ鉛直の面に投影された震源分布図 (Cardwell *et al.*, 1980) から推定されたモルッカ海プレートの沈み込み (Nishimura, 1997)。

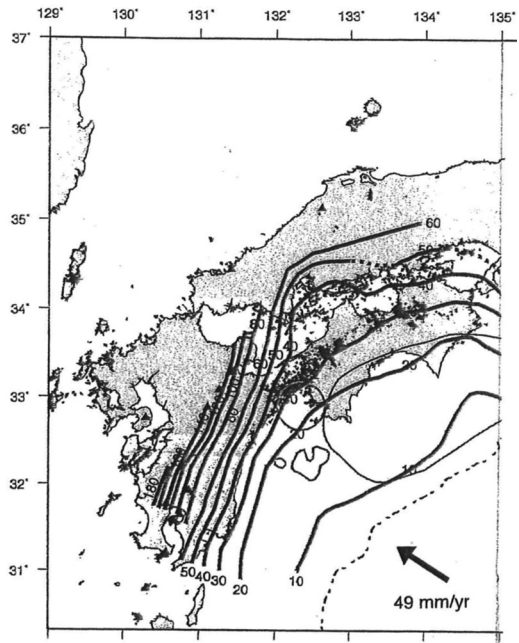




第9図 サンギヘ火山弧の火山岩の顕微鏡観察での帯状分布。

100~300の曲線は第8図から推定された沈み込みスラブのkmで表した等深度を示している。震源の位置の決定は日本弧のそれよりも少し精度が悪いかかわらず、火山の帯状分布がきれいに示されている。

(Nishimura, 1997). T: ソレイアイト岩系; CT: ソレイアイト岩系のカルクアルカリ岩; H<sub>1</sub>: 高アルカリソレイアイト玄武岩系; H<sub>2</sub>: 高アルカリソレイアイト玄武岩系のカルクアルカリ岩。近くの汚染がほとんどないのに異モデルが明確に示されている。

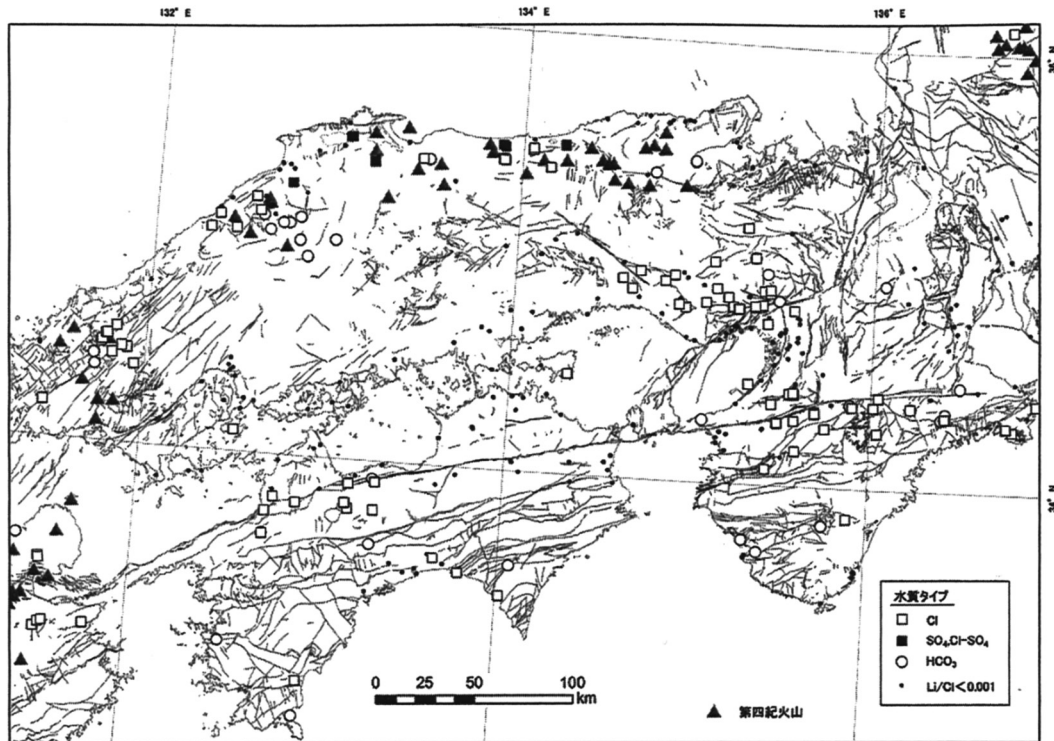


第10図 西南日本下のフィリピン海プレートの上の面の等深度線図 (Km) (弘瀬ほか, 2007). 黒点は低振動深発地震の震源. 矢印はフィリピン海プレートの沈み込みの方向を示す。

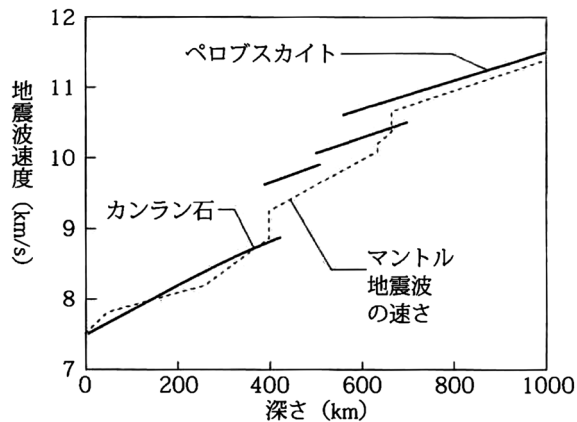
範囲内に 50℃以上の温泉の湧出が多く知られている (北岡ほか, 2014)。

山陰地方被害地震の分布、鳥取地方の主な地震の地殻応力 (圧縮力) の方向は東西で、海岸線に近くは東西方向の横ずれ断層が平行に通っていて、ところどころ引張の場ができ、その部分を通じてマグマの上昇があったとみられる。圧縮の場では逆断層か横ずれ断層が発達するが、横ずれ断層の場合はところどころ引張の場ができ熱水の湧出がみられる。同じ現象はスマトラ大断層で典型的な例が見られる (西村, 1980)。

山陰地方の日本海沿いには日本海ができたとき本州弧の平行移動とそのあとの西南日本弧の時計回りの回転の影響を受け東西方向の横ずれ断層に沿って、ところどころにアルカリ玄武岩系の火山活動や地熱活動がみられる。



第 11 図 山陰の日本海岸、益田-津和野-山口の谷筋に位置するアルカリ玄武岩系列の単成火山の分布。丹後半島から大山・三瓶山に至る海岸線に並ぶアルカリ玄武岩系の単成火山の分布と益田-津和野-山口の谷から西傾斜の沈み込みに伴う単成火山の分布 (風早ほか, 2014 に加筆)。



第 12 図 地球内部と橄欖岩の地震波速度の関係図。地震波速度が変わる橄欖岩の相変化のところでは脱水する (笠原ほか, 2002)。

### 5. 日本海ができたときにどのような地殻変動の活動があったか？

日本海が生じたときの運動は第 13 図に示すように棚倉構造線より西南日本弧は時計回りの回転と東北日本弧の平行移動とされている。西南日本弧ではこの地殻変動のとき地殻下部が部分熔融して酸性岩マグマが生じたと考えられる。この場の温度は現在約 600℃ 程度と考えられ、本州弧の西端におけるコルデロンの生成やそれに伴う酸性岩の貫入・溶結凝灰岩の噴出が見られる。一方フィリピン海プレートの下部への沈み込みが進み、九州中部・南部の火山活動がみられるよ

うになった。フィリピン海プレートの北西方向の沈み込みは益田-津和野あたりでは急傾斜で 200 km 程度は観測され、山口に南下するに従い傾斜が緩くなると観測されるが、討論は次の機会に譲りたい。ただ、津和野付近には安山岩質の単成火山が見られ、その南西への谷筋には温泉の湧



第 13 図 約 1500 万年前の岩石から得られている古地磁気方位の偏角と、西南日本ブロックと東北日本ブロックの回転運動の概略図。石川（1995）はその回転時に西南日本の西端は対馬で衝突して変形したとするが、その時のフィリピン海プレートの変形を推定している。その構造は山陰の火山活動を制約している。

出が見られることを指摘しておこう。

また、衝突の後中央構造線の大きな横ずれ断層が発達し、中央構造線上に高マグネシウム安山岩の噴出が見られた。マグマの貫入により、その周辺に高アルカリの温泉や鉱泉の分布がみられる。

山陰の海岸沿いほぼ東西の横ずれ断層に沿い、アルカリ玄武岩系の単成火山の噴火に伴う高温の海水の成分に近い泉源が並ぶ。これは城崎温泉で代表される食塩泉である。これは太平洋プレートの沈み込みで橄欖石の相の変換時（深度約 450-600 km）の脱水によるその上部のマントルの部分溶融の火山活動と考えられる。断層の南側にはところどころ地殻下部が部分溶融して酸性のマグマを生じ、酸性岩の貫入・溶結流紋岩の噴出（コルデロンの生成に伴う）がみられる。これには、三朝温泉で代表されるラドン高温泉がところどころ湧出している。

## 6. ま と め

山陰の日本海側には、アルカリ玄武岩系の単成火山が丹後半島から大山までならば、この並びで地質構造が異なる。またところどころこの構造に直角に近い河川が流れていて、その酸性陥入岩体のところでこの南北性の短い断層に沿って高温のラドンを含む泉源の分布がみられる。益田—津和野—阿東—山口—小郡の谷沿いに、フィリピン海プレートは急傾斜で西北にもぐり込んでいる。この谷の北部では阿武単成火山の存在とアルカリ玄武岩系の火山岩がみられるが、討論は次の機会に譲り、今回は次の考えに対して討論ができれば幸いである。

- ①丹後半島の付け根から大山にかけて、アルカリ玄武岩系火山岩系の単成火山が並ぶがその南側に火山フロントが引けない。ここでは大きな地震の震源分布も東西方向に並ぶ。
- ②東北地方の太平洋プレートの沈み込みで定義された異モデルでは深発地震の 110 km 深度の地表に火山フロントが生じ、110 km 深度で角閃石・緑泥石が脱水分解し、ソレイアイト玄武岩系の那須火山帯、170 km 深度で金雲母の脱水分解する高アルミナソレイアイト玄武岩系の鳥海火山帯の並行する火山帯がみられるとあるが、丹後半島から大山の山陰の単成火山はアルカリ玄武岩系の火山活動しか見られない。アルカリ玄武岩系の火山は火山帯を作らない。  
なお、異モデルの正当性は、インドネシアのサンギヘ火山列で見事証明できる。
- ③フィリピン海プレートは益田—津和野—山口—小郡の谷間から西北方向に潜り込んでいる。また、対馬と西南日本弧の衝突の影響が今でも続いている。  
また、ここでは日本海のできた影響が今でもみられる。

### 引用文献

- Cardwell, R.K., Isacks, B.L. and Karig, D.E. (1980) : The Spatial Distribution of Earthquakes, Focal Mechanisms, and Subducted Lithosphere in the Philippine and Northeastern Indonesian Islands, in *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands*, ed. Hayes, 1-35, Geophysical Monograph 23, U.S.A.
- 藤田和夫 (1983) : 日本の山地形成論, 466 頁, 蒼樹書房, 東京.
- Furuyama, K., Nagao, K., Mitsui, S. and Kasatani, K. (1993) : K-Ar ages of Late Neogene monogenetic volcanoes in the east Sannin district, Southwest Japan, *Earth Sci.*, **47**, 519-532.
- 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川昭 (2007) : Double-Difference Tomography 法による西南日本の 3 次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, *地震*, **60**, 1-20.
- 石川尚人 (1995) : 日本列島は新生代にどのような動きをしたか—日本海の生成発達史—, 公開講演要旨, 19-29, 日本地質学会関西支部.
- 石森 有 (2014) : 原子力機構人形峠環境技術センターと三朝ラドン効果研究, *温泉科学*, **64**, 289-295.
- 笠原順三・鳥海光弘・川村雄行編 (2002) : 地震発生と水, 392 頁, 東大出版, 東京.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—分冊 1 わが国の地質環境.
- 風早康平 (2014) : 西南日本における温泉水の成因について: スラブ起源深部流体の特徴と分布 (公開講演), *温泉科学*, **64**, 282-287.
- 北岡豪一・吉岡龍馬・西田良平・山口一裕, 竹内 徹 (2014) : 山陰地方における花崗岩割れ目系の深部水循環による高温温泉水の形成 (原著), *温泉科学*, **64**, 77-106.
- Kumagai, N., (1940) : Studies in the distribution of gravity anomalies in North-East and the

- central part of the Nippon Trench, Japan, *Jap. Jour. Astro. Geophys.*, 11, No. 3.
- 久野 久 (1954) : 火山及び火山岩, 255 頁, 岩波書店, 東京.
- Kuno, H. (1960) : Lateral variations of basalt magma type across continental margins and island areas, *Bull. Volcanol.*, **29**, 196-222.
- 新妻信明 (2006) : 中部地方の基本枠組を構成する付加体の帯状構造, 日本地方地質誌—中部地方, 日本地質学会編, 2-17.
- 西田良平 (2014a) : 山陰地方の地震活動と温泉観測 (解説), *温泉科学*, **64**, 107-120.
- 西田良平 (2014b) : 地震活動と温泉の温度変化の関係 (公開講演), *温泉科学*, **64**, 267-274.
- Nishimura, S. (1980) : *Physical Geology of Indonesian Island Arcs*, pp. 255, Kyoto Univ, Kyoto.
- 西村 進 (1980) : 南九州とスマトラの火山活動と火山, *京大防災研究所年報*, **23**, 15-21.
- 西村 進 (2001) : 近畿地方北部の第四紀単成火山と地質構造, *自然と環境*, **3**, 22-20.
- 西村 進 (2014) : 山陰の温泉とその地質構造 (解説), *温泉科学*, **64**, 64-76.
- Nishimura, S. (1997) : Quaternary volcanism of the Indonesian islands, *Proceedings 6th International congress on Pacific Neogene stratigraphy and IGCP-355*, 127-149, Kyoto Univ., Kyoto.
- Nishimura, S. and Ikeda, T. (1978) : *Geochemical Studies of Volcanic Rocks of Sunda Island Arc, Indonesia (1)*, スンダ列島弧の物理地質学的研究 63-83, 京都大学, 京都.
- 先山 徹・松田高明・森本速男・後藤 篤・加藤茂弘 (1995) : 兵庫県北部の鮮新世～更新世火山岩類—K-Ar 年代・古地磁気・主化学組成, *人と自然*, **6**, 149-170.
- 高橋正樹 (2000) : 島弧・マグマ・テクトニクス, 323 頁, 東大出版, 東京.
- Tatsumi, Y. (1989) : Migration of fluid phases and genesis of Basalt magmas in subduction Zones, *Jour. Geophys. Res.*, **94**, 4697-4707.
- 巽好幸 (2011) : 沈み込み帯のマグマ学, 186 頁, 東大出版, 東京.
- 鳥海光弘 (2008) : 地球システム学のすすめ, 226 頁, NTT 出版, 東京.
- 宇津徳治 (1977) : 地震学, 286 頁, 共立出版, 東京.
- Whitford, D.J., (1975) : *Geochemistry and Petrology of volcanic rocks from the Sunda Arc, Indonesia*, pp 374, a thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Australian National Univ.