

紀伊半島における前弧火成作用と温泉

京都自然史研究所

西村 進

〒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

(平成11年6月30日受付、平成11年8月31日受理)

Forearc volcanism and hot-springs in Kii Peninsula, Southwest Japan

Kyoto Institute of Natural History

Susumu NISHIMURA

Abstract

There are hot-springs along the dikes and faults near the Kumano-Omine Asidic Intrusions and mineral deposits in the Kii peninsula, Southwest Japan. These intrusions were related to forearc volcanism, of which ages are 15~14 Ma during and after the 45° clockwise-rotation of Southwest Japan. These igneous bodies have been cooled. The sources of these hot-springs might be mixing of the undergroundwater and dehydrated water from a convergent Philippine Sea plate through the cracks in the igneous intrusions and dikes. The chemical characters of hot-springs and geophysical evidences supported this interpretations.

Keywords: forearc volcanism, hot-spring, Kumano-Omine acidic intrusion, Kii Peninsula.

キーワード: 前弧火成作用, 温泉, 熊野大峰酸性岩体, 紀伊半島

1. はじめに

紀伊半島には、所々に昔から高温～低温の温泉が自噴や浅い掘削によって得られている。これらの成分は重曹・塩類泉が多く、硫化水素を含むことも多い。海岸近くでみられる温泉の一群は田辺湾沿いにみられ、白浜温泉が最も高温で、南の方には椿温泉まで続く。次に古座川のリングダイク沿いと、リングダイクの西端と東端では南北の小断列帯に温泉の湧出がみられる。とくに、東端の湯川温泉・勝浦温泉は有名である。

内陸部の日高川の源流に龍神温泉があり、 He^3/He^4 比が高い(Wakita, et. al., 1987)。東の峠を越えて十津川の支流上湯川に十津川温泉上の湯、下の湯が東西にみられ、十津川の二津野ダムの人工湖の最北端の近くに湯泉地温泉の湧出がみられる。十津川は果無山脈を横切り南流し熊野川となり、本宮町に入る。中辺路の本宮に出る少し手前に湯の峰温泉が沸騰泉として湧出している。ここでも He^3/He^4 比が高い(新エネルギー産業技術総合開発機構, 1993)。湯の峰温泉から東南に小さな尾根を越え、渡瀬温泉さらに川湯温泉がみられる。筆者の卒業当時(1956)三ヶ月におよぶはじめての温泉調査の地域である。また平成3,4年度の近畿地方で唯一の地熱開発促進調査の実施場所になり、筆者は幸運にも調査及び調査結果の検討に参加した(新エネルギー産業技術総合開発機構, 1993; 1994)。

これらの温泉の存在は非常に古くから知られているが、海洋プレートの付加体の四万十累帯の中

で、熊野酸性岩類の火成作用等との関連の議論がされているが、これらの温泉の成因がなかなかわからなかった。

最近、近畿地方の地質構造の解析と将来予測の研究を進め(西村, 1998) また、島弧の火成活動の研究を進めてきた(Nishimura and Suparka, 1986; Nishimura, 1998)。その結果、紀伊半島における温泉は前弧火成活動・沈み込みのフィリピン海プレートの脱水との関連があるとの考察にいたった。

2. 既存温泉の湧出状況

紀伊半島に古くから湧出する温泉源は、時期の異なる幾つかの層準の付加帯である四万十累帯およびそれを不整合で被う田辺層群に胚胎している。しかし湧出の機構は類似している。四万十累帯の構造は東北東-西南西の走向で北落としの衝上断層で、Fig.1,2に示すように一般に北側が古く、各断層間では北側のほうが若い深海成の堆積岩でできていて、付加帯の特徴を示している。

各温泉源は衝上断層やほぼ南北の熊野酸性岩・大峯酸性岩や火砕岩岩脈・気成・熱水鉱床の貫入と関連があり、最終的にはあまり長い距離の続かない南北性の引張りの亀裂から湧出していることが多い。次に地層の古い方から述べる。

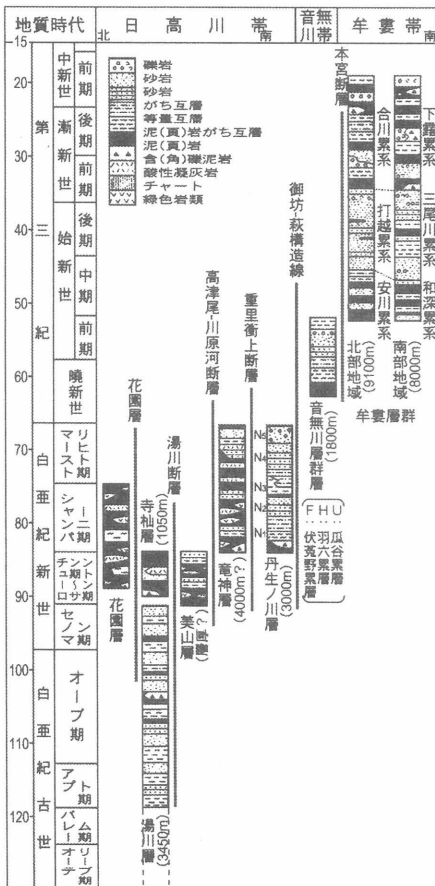


Fig.1 Stratigraphic division and lithofacies of Shimanto supergroup in Kinki peninsula (Kinki District, 1987)

図1. 紀伊半島四万十累帯の層序と岩相(近畿地方, 1987)

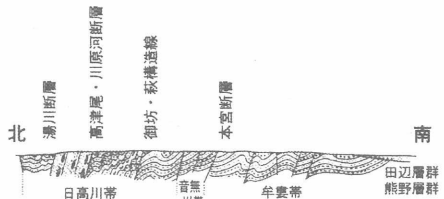


Fig.2 Section of Shimanto supergroup in Kinki peninsula (modified from Kinki District, 1987)

図2. 紀伊半島四万十累帯断面図

2-1. 龍神温泉、十津川温泉上の湯・下の湯、湯泉地温泉

龍神温泉、十津川温泉、湯泉地温泉は仏像構造線の南側、御坊一萩構造線の北側の日高川帯の西中衝上断層、重里衝上断層沿いにみられ、十津川温泉、湯泉地温泉の少し東側には南北方向に火砕岩岩脈、大峯酸性岩(中新統)が貫入している(Fig.3)。

古い温泉地帯では掘削深度や温度検層の結果が知られていないので、近畿地方の地熱構造を研究するのにデータ不足で困ったが、Table 1 に示す値を得ている。それによると、また公表の分析表による温度からみると高温の部分はスポット的で地殻の構造の支配を強く受けている。

2-2. 湯の峰温泉・渡瀬温泉・川湯温泉

湯の峰温泉・渡瀬温泉・川湯温泉の地域は近畿地方では唯一の地熱開発促進調査(No.37 本宮地域)が平成3,4年度(1991~1993)になされた場所で、著者が1956年

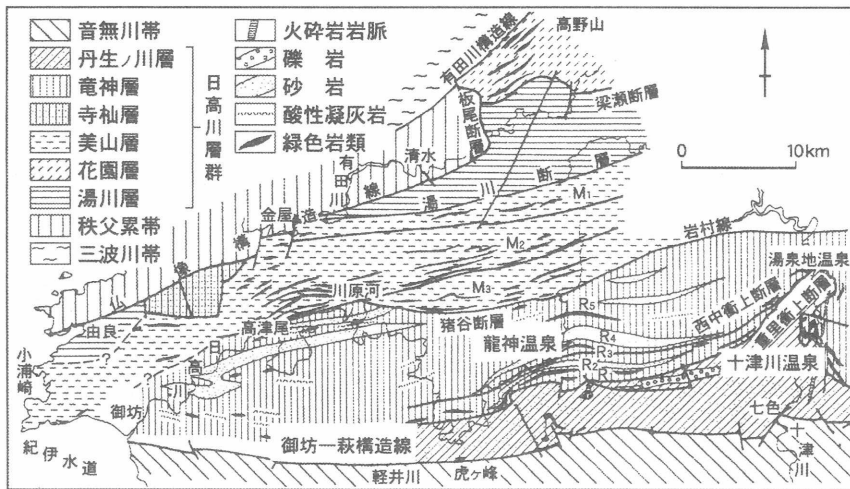


Fig.3 Ryujin, Kaminoyu- and Shimonoyu-Totsugawa and Tosenji hot-springs related to Hidaka belt of Shimanto supergroup (modified from Kinki District, 1987)

図3. 四万十累帯日高川帯と龍神温泉・十津川温泉上ノ湯、下の湯・湯泉地温泉

Table 1 Drilling depths and their bottom temperature of some hot-springs in Kii Peninsula
表1 紀伊半島で掘削深度と孔底温度のわかっている泉源

No.	Localety 地名	bottom temp. 孔底温度(°C)	drilling depth 孔底深度(m)	apparent thermal gradient 見掛けの温度勾配 (°C/100m)
1	田辺市滝内-1	49.6	700	4.9
2	田辺市滝内-2	50.0	660	5.3
3	田辺市滝内-3	48.8	720	4.7
4	田辺市新庄町	46.5	550	5.7
5	白浜町鳳切	56.0	402	10.2
6	白浜町湯崎	90.0	138	54.3
7	白浜町湯崎	80.3	100	65.3
8	白浜町湯崎	1.3	127	44.3
9	白浜町藤の湯	63.0	280	7.1
10	白浜町江津良	9.5	500	6.9
11	白浜町鷹の鼻	43.6	540.2	5.3
12	白浜町畑崎	46.4	550.4	5.7
13	白浜町西富田	34.8	480	4.1
14	白浜町西富田	32.7	488	3.6
15	白浜町才野	37.5	489.8	4.6
16	白浜町堅田	60.8	706	6.5
17	白浜町網野	55.4	692	5.8
18	白浜町尺渡	33.5	300	6.2
19	すさみ町周参見	27.6	500	2.5
20	すさみ町周参見江住	25.7	500	2.1
21	串本町大水崎	38.5	574	4.1
22	串本町野川	27.3	220	5.6
23	串本町野川	30.2	290	5.2
24	串本町串本	30.9	300	5.3
25	那智勝浦町市屋	32.5	501	3.5
26	那智勝浦町二河	33.7	434	4.3
27	本宮町上大野	32.8	500	3.6
28	十津川町下湯	68.0	50	106
29	十津川町上湯	78.0	60	105

3~6月の3ヶ月間温泉調査をした記録も参考にまとめてみると、Fig. 4に示すように、御坊一萩構造線から本宮断層ではさまれる音無川層群中である。ここには変質帯がなかなかみつからず見込みが薄いと結論づけていたが、地熱開発促進調査で三越川、熊野川の東部に変質部がかるうじてみつきり(Fig.5参照)掘削調査がなされた。本宮断層の南側にも皆地断層より東北部は音無川南帯とされ、この部分に湯の峰温泉・渡瀬温泉・川湯温泉が存在する(Fig.4)。物理探査の結果、NW-SEの方向に不連続部があり、掘削もなされ、-500m、-1,000m深度の温度分布(Fig.6, 7)も測定され高温の部分の方向も同じであるが、コアの検査でも変質がすくなく、高温部は深部ほど広がり、1000mの孔底温度が規定にわずか満たなかったため、惜しくも熱源を見極めることなく調査が打ちきりになった。熊野川の東側には熊野酸性岩の貫入も考えられる。

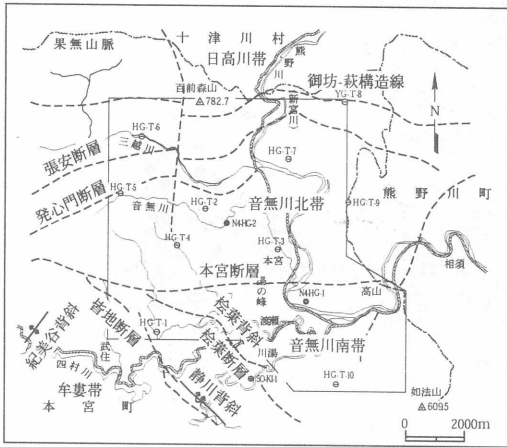


Fig.4 Yunomine, Watase and Kawayu hot-springs related to Otonasigawa group of Shimanto supergroup (modified from NEDO, 1994)

図4. 四万十累帯音無川層群と湯の峰温泉・渡瀬温泉・川湯温泉

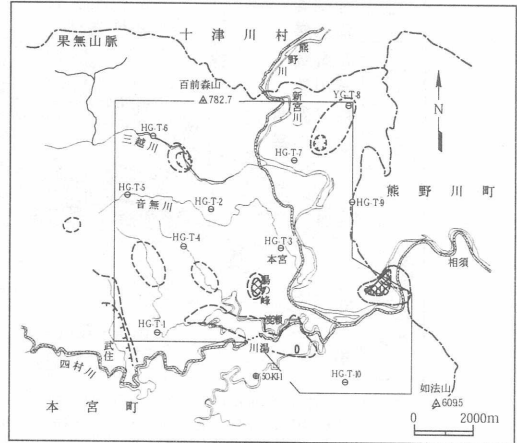


Fig.5 Metamorphic zone in Otonashi group (NEDO, 1994)

Mineral assemblage of Kaolinite zone is composed from kaolinite, sericite and granz. This belt is occupied at large part of Yunomine and Takayama metamorphic belts and also distribute as some spots in Kawayu and Magarigawa metamorphic belt. These belts have been occurred by acidic and neutral hydrothermal reaction. This temperature of reaction was estimated as 200°C. Silicified zone in this area is distributed as guarzite shown over Q 140(quartz index). This belt is accompanied with pyrite and pyrrhotite related to neutral hydrothermal reaction.

図5. 音無川層群の変質帯分布

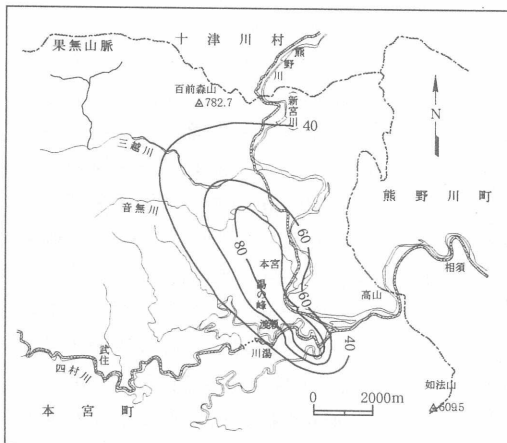


Fig.6 The distribution of temperature at the -500m level (NEDO, 1994)

図6. 音無川層群の海拔-500m準の温度分布

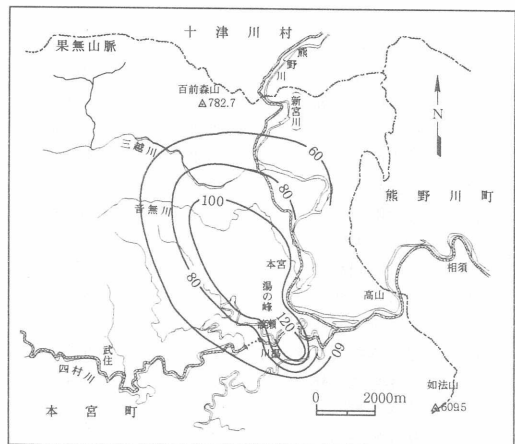


Fig.7 The distribution of temperature at the -1000m level (NEDO, 1994)

図7. 音無川層群の海拔-1,000m準の温度分布

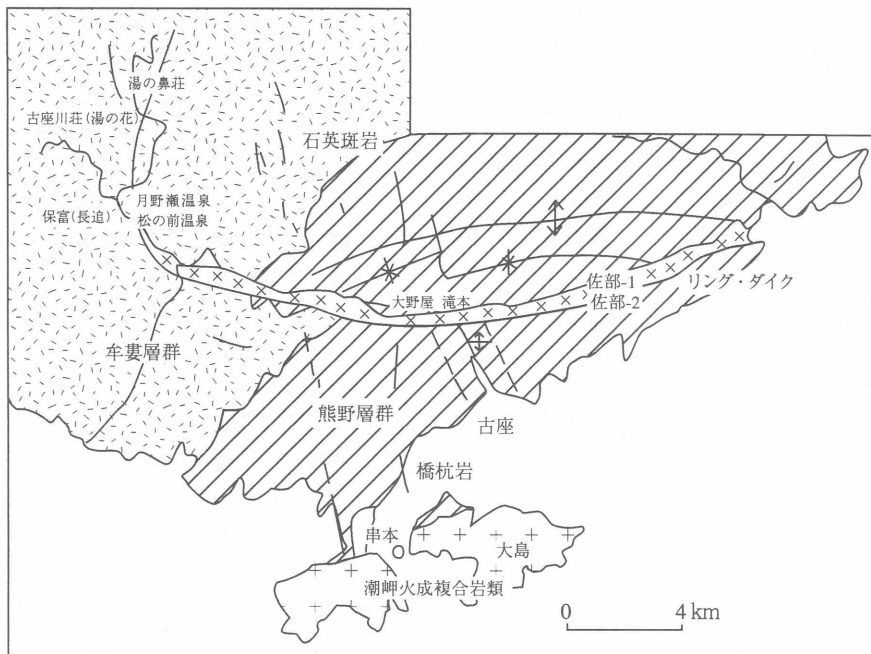


Fig.8 Hot springs related the western part of ring dike at Koza- and Kozagawa-chos
 図8. 古座川町・古座町のリングダイクと近辺の温泉

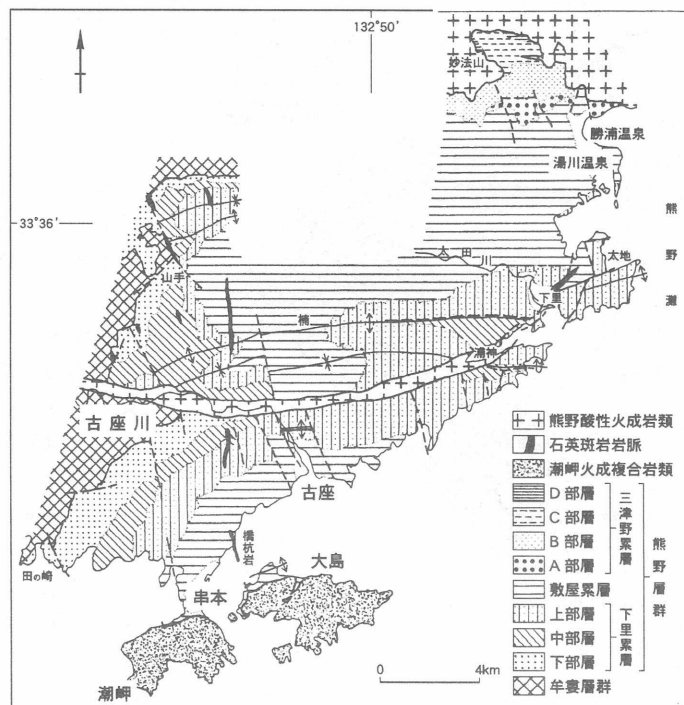


Fig.9 Yukawa and Katsura hot-springs related the eastern part of ring dike (modified from Kinki district, 1987)

図9. リングダイクの東部と湯川温泉・勝浦温泉

Table 2 Hot-springs along ring-dike, at Koza- and Kozagawa-cho
表2 古座町及び古座川町リングダイクに沿う温泉

No.	name of hot-spring 温泉名	drilling depth 掘削深度(m)	temperature of hot-spring 孔口温度(°C)	pumping volume 湧出量(l/分)
1	湯の鼻荘	160	33.8	360
2	大野屋	200	38	180
3	滝本	300	31	118
4	古座川荘(湯の花)	350	26.5	224
5	保富(長迫)	100	34.7	311
6	月野瀬温泉		33.5	40
7	松の前温泉		30.0	171
8	佐部-1	50	27.0	30
9	佐部-2	100	29.0	311

2-3. 古座川町・古座町のリングダイクの周辺の温泉

古座川添いにFig. 8, 9に示すようにリングダイク(通常ここでは岩脈の外側は泥岩砂岩で中央部に石英斑岩の岩脈)がみられる。このダイクは西側では牟婁層群を切り、東側では牟婁層群を不整合で被う熊野層群(中新統)も切っている。このダイクの中にも深度の浅い掘削で温泉が得られている(Table 2)。しかしその西端では南北に広く引つ張りの破碎部が出来、鉍化帯がみられる。この部分に多くの温泉の自然湧出地点が分布している。又東側にも南北の破碎部があり、湯川温泉・勝浦温泉が存在する。

2-4. 白浜温泉を中心とする温泉群

紀伊半島の西端にTable 1に示すように白浜町湯崎を中心として、北は田辺市、南は温度が低いが古くから知られている椿温泉が知られている。この地域はFig.10に示すように四万十累層群に不整合で中新統の田辺層群が覆う。泉源は田辺層郡白浜累層中に存在する。湯崎のすぐ東には鉛山の鉍床がある。E-W方向に背斜軸・向斜軸がみられるが、この構造は四万十累層群へ追跡出来る。湯崎から田辺湾に添っては碎屑性の貫入岩脈が多くみられる。又椿温泉の東には東西にのびる大きな碎屑性貫入岩がみられる。ひとつひとつの泉源は南北の亀裂沿いに掘削されている。

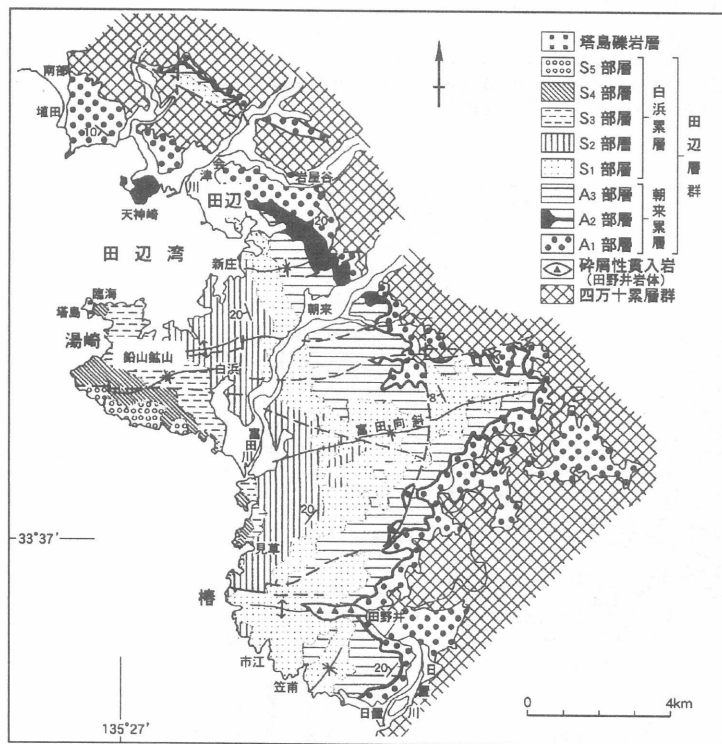


Fig.10 Shirahama and Tsubaki hot-springs related to Tanabe group (modified from Kinki district, 1987)
図10. 田辺層群と白浜温泉・椿温泉等

3. 近畿地方での新生代火成活動

近畿地方での噴火活動は、15Ma頃のサヌカイト類の瀬戸内の噴火・貫入活動、14Maを中心の前弧火成活動(熊野酸性岩類・大峯酸性岩類・碎屑岩岩脈・石英斑岩岩脈の貫入・噴火)、その後内帯の山陰地方のイグニンプライトの噴火に伴うカルデラ形成の噴火活動がみられる。第四紀に入り内帯でのアルカリ岩の単成火山の噴火が神鍋火山(2~3万年前)までみられ、その噴火後、近畿地方では火山活動は全く見られていない。この現象をプルームテクトニクスで説明しようとする試みが著者によりなされた(Nishimura, 1998)。それを少し改訂して次にまとめる。

3-1. 近畿地方の地震活動とマンツルのp波トモグラフィ

1983年1月から1996年5月の間に正確に求められた震源分布をFig. 11に示す。更に、Fig.11の枠内の震源の断面分布をFig.12に示す(原子力環境整備センター,1997)。低角で北西方向に約60km深度まで見える震源分布はフィリピン海プレートの沈み込み帯によるものである。

沈み込み帯が浅いため明白ではないが、この沈み込み帯の上面にプレートからの脱水による流体の上昇に伴う地震もみられる。特に和歌山市の近くでは群発地震が頻発していて、流体の上昇とみられる。これは龍神温泉・湯の峰温泉の³He/⁴He比の大きいことから示唆される(Wakita, et. al., 1987, エネルギー産業技術総合開発機構,1993)。

Fukao et al. (1994)のマンツルp波トモグラフィの結果、またそれに対する解釈がMaruyama (1994)の提唱であり、マンツル内の沈み込みプレートの動きが検討されるようになった。スンダ島弧・西南本州弧の火山活動の解釈も出来た(Nishimura, 1998)。その後、詳細な北西太平洋のp波トモグラフィの検討もなされ(Tajima, et al.,1998)、西南本州弧では明白な沈み込み帯はみえないが、比較的速度の速い明白な60kmまでの

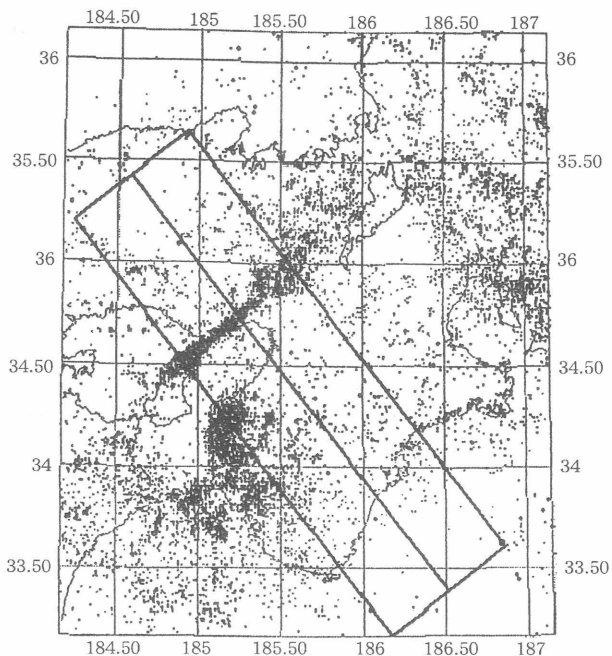


Fig.11 The distribution of Hypocenters occurred from January 1988 to may 1996 (Nishimura, 1998)
 図11. 近畿地方で1983年1月から1996年5月の間に発生した震源分布

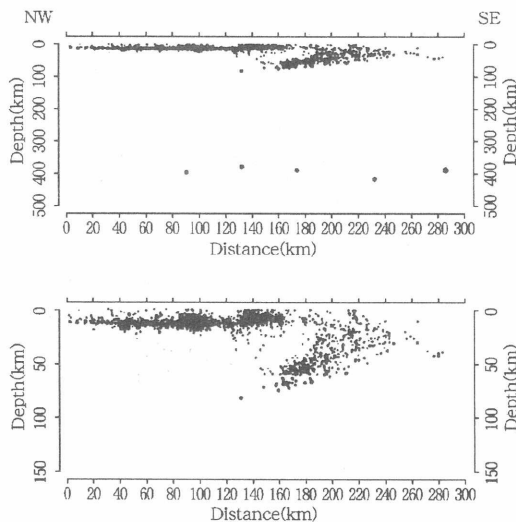


Fig.12 The section of the distribution in the squared area in Fig.11 (Nishimura, 1998)
 図12. 近畿地方で1983年1月から1996年5月の間に発生した震源分布の断面(囲いの枠内を中央の面上に投影したもの)

地震帯の連続が更に深さ670km以上までも推定出来るとしている。これは沈み込み帯が落ち込んだ痕跡と考えても良い。

3-2 沈み込み帯にともなう島弧の火山活動

海洋地殻が中央海嶺で生まれ、同時に海水による熱水変質作用を受ける。その結果多量の含水鉱物ができ、水を含んだ地殻が水平移動して、海溝で沈み込む。

高圧・高温実験の結果を加味して、Tatsumi (1989)、巽(1995)は50~60kmの深度で玄武岩中の角閃石の脱水反応、100km深度でのカンラン岩中の角閃石の

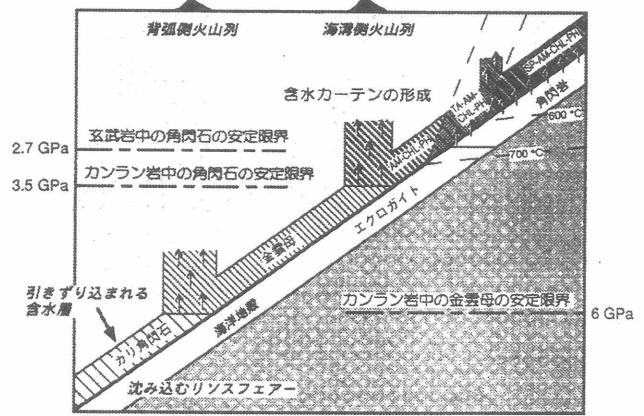


Fig.13 A plausible model for the migration of H₂O and the generation of basalt magmas in subduction zones (Tatsumi, 1995)
 図13 沈み込み帯でのH₂Oの発生と玄武岩マグマの発生の関係

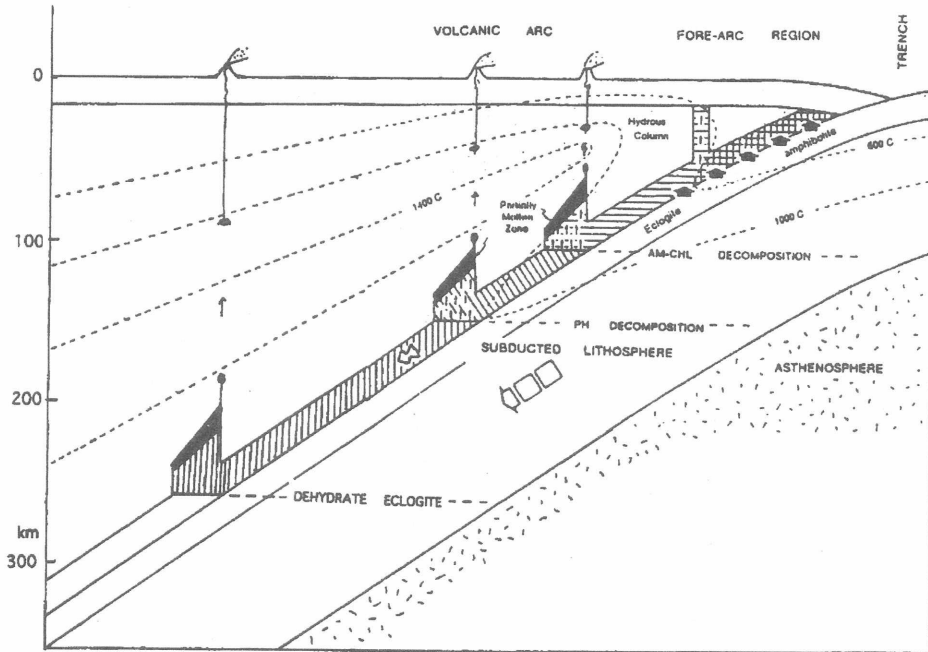


Fig.14 Modified from fig.13 (Nishimura, 1998)

The hydrated peridotite is formed by addition of slab-derived H₂O (solid arrows) beneath the forearc region and should be dragged downward on the slab by the subduction of oceanic lithosphere. Amphibole (AM) and chlorite (CHL) in the dragged hydrated peridotite layer decompose to release H₂O at around 110km just beneath a volcanic front, phlogopite (pH) decomposes at around 150km, and lawsonite peridotite dehydrated at around 250~300km beneath the backarc side of a volcanic arc. When the front of migration of H₂O from the hydrated peridotite reaches the region with the solidus temperature of hydrous peridotite. Partial melting takes place to produce initial magmas. Successive addition of H₂O to the region expands the partially molten zone upwards in which the degree of partial melting increases upwards. From the top of the partially molten zone a mantle diapir starts rising. The mantle diapirs must go though the region with temperatures higher than 1400°C and stop rising to release primary magmas. The depth of magma segregation from a mantle diapire is deeper in the backarc side. It should be stressed that the solidus temperature of hydrous peridotite (1000°C at depth shallower than 100km) cannot be attained in normal subduction zone. It follows that no magma can be produced by partial melting of hydrous column beneath the forearc region.

図14 図13を改めたダイアピルの上昇とマグマ発生の模式図

脱水反応、150km深度でのカンラン岩中の金雲母の脱水反応で H_2O がマントル中を上昇する(Fig.13)。通常の古いプレートの沈み込みでは、100km以上の深さの上部のマントルにFig.13に示すように1300℃以上の部分が存在し、部分熔融してマグマの発生がみられる。そこで二列の火山列が見られるのだとみごとに解釈をした。しかし、古いプレートの沈み込み帯では三列めのアルカリ玄武岩の火山活動が有ることを西村は指摘していた。後、岡本他(1997)の指摘のように、250~300km深度でローソン石エクロジャイト相が脱水反応することが、超高压実験で示されたことにより、Nishimura(1998)はFig.14のような提案をした。

ここで60~50km深さまでの脱水の上昇部にはマントルを部分熔融するような高温部がなく、 He^3/He^4 比の高い熱水流体を上昇させる。

3-3 前弧火山活動(fore-arc volcanism)

本州弧は21~16Maに平行移動して、初期の日本海を作りだした。さらに、西南本州弧は15Ma頃約500時計廻りに回転して、一方、幾つかのテレインよりなる東北本州弧はブロック回転し、全体として平行移動して現在の日本海を生成した(西村, 1998)。

この時期に前述のように西南本州弧では前弧火山活動がみられる。日本海の生成はプルームテクトニクスにより説明できる。670km深度に沈み込み帯のスラブが溜まり、下部マントルに落ち込んだ。その時に、まず本州弧の平行移動があり、朝鮮半島の東海岸や日本海に玄武岩の噴出が20~18Maにみられる(KIGAM, 1995)。それに続き西南本州弧の回転が起こるが、そのため沈み込みのスラブは切れて急激に落ち込み、100kmより浅い部分で急激なマントルの動きを起こし、西南本州弧の中央部に地殻の薄化が起こり、沈み込みスラブの若返りや沈み込みの角度も低く、第一次瀬戸内ができ、サヌカイト・サヌキトイドの噴出があり、それより海溝側では沈み込んだ玄武岩質海洋地殻・下部地殻の再熔融が南北に延びるクラックに沿って貫入した。さらにこれらにクラックができ、岩脈の貫入が最後にみられた。

5Maごろ、切れたスラブの端が300kmの深さを通過して、脱水反応が起きなくなり、アルカリ玄武岩の活動も神鍋火山の噴火を最後に終わり、現在では一部に残熱的熱水活動が山陰地域でみられるだけになった。

4 紀伊半島の温泉の成因

14Maの前弧火山活動はそのマグマの量と貫入・噴出時からみて現在それらの残熱があるとは思えない。また現在から今後数十万年マグマの発生が有るとは考えられない。沈み込み帯のスラブが60km深度までみられ、スラブからの脱水反応はあるので、深い断層・亀裂があればお高温の温泉湧出が見られる筈である。この深い断層・亀裂は前述の熊野酸性岩・大峰酸性岩、リングダイク・碎屑岩岩脈に出来やすいので、それに沿い熱水が上昇すると、最後は四万十帯の断層・亀裂に支配されて地上に温泉がもたらされていると解釈される。

文献

Fukao, Y., Maruyama, S., Okabayashi, M., and Inoue, H. (1994): Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography, *J. Geol. Soc., Japan*, 100, 4-23.

原子力環境整備センター(1997): 平成8年度低レベル放射性廃棄物処分可視画像化調査報告書。

近畿地方編集委員会(1987): 日本の地質6, 近畿地方, 共立出版, 東京, 297頁。

KIGAM (Korean Institute of Geology, Mining and Materials (1995): Isotope age map of volcanic rocks in Korea.

- Maruyama, S. (1994): Plume tectonics, *J. Geol. Soc., Japan*, 100, 24-29.
- Nishimura, S. (1998): Quaternary arc volcanism of Sunda and Southwest Japan Arcs, *Proc. Symp. Japan-Indonesia IDNDR Project*, Sept. 21-23, 1998, Bandung, Indonesia, 25-37.
- 西村進(1998): 地質構造の解析と将来予測—近畿地方を例として—, *資源と素材*, 114, 753-762.
- Nishimura, S. and Suparka (1986): Tectonic development of East Indonesia, *J. S.E. Earth Sci.*, 1, 45-57.
- 岡本和明, Max Schmidt, 丸山茂徳(1997): 海水をマントルに運ぶ, *科学*, 87, 478-479.
- 新エネルギー産業技術総合開発機構 (1993): 平成3年度地熱開発促進調査データ処理報告書, No. 37 本宮地域, 633頁.
- 新エネルギー産業技術総合開発機構 (1994): 平成4年度地熱開発促進調査データ処理報告書, No. 37 本宮地域, 885頁.
- Tajima, F., Fukao, Y., Obayashi, M. and Sakurai, T. (1998): Evaluation of slab in the northwestern Pacific, *Earth Planets Space*, 50, 953-964.
- Tatsumi, Y. (1989): Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas, *J. Geophys. Res.*, 94, 4697-4707.
- 巽好幸 (1995): 沈み込み帯のマグマ学, 全マントルダイナミクスに向けて, 東大出版, 東京, 186頁.
- Wakita, H., Sano, Y. and Mizoue, M. (1987): High ^3He emanation and seismic swarms observed in a non-volcanic, forearc region, *J. Geophys. Res.*, 92, 12, 539-12, 546.