

## 4. 島弧の地熱活動と沈み込みプレート —南九州とスマトラの地熱・温泉の類似性から— Geothermal Island-Arc Genesis at the Plate Margins —On the Similarity of the two Geothermal Island-Arc Genesis in Southern Part of Kyushu, Japan and Sumatra, Indonesia—

特定非営利活動法人シンクタンク京都自然史研究所 西村 進

(平成 19 年 4 月 19 日受付, 平成 19 年 6 月 14 日受理)

Susumu NISHIMURA (NPO Think-tank Kyoto Institute of Natural History)

### Abstract

Geothermal island-arc genesis are found in graben and caldera along the big-fault systems of Southern part of Kyushu, Japan and Sumatra, Indonesia. The magma of ignimbrite and welded tuff ('Shirasu') might be originated from the remelt of oceanic plate and/or crustal materials, when the front of Philippine and Indian Sea plates is subducted to nearly 110 km in depth. These oceanic plates are subducted obliquely to trench axis. The volcanism of these ignimbrite and Shirasu is so violent as to make a big caldera, of which Bouguer anomalies are about 50 mgal lower than those of the surrounding area, and the big caldera has the diameter of 15~20 km which is disturbed the big-fault systems.

After these activities, the dacite and andesite volcanisms occur, which make the central cone of volcanoes. The magma of these volcanoes is quite different from that of ignimbrite and welded tuff in the genesis. The magma must be originated from the partial-melt of the upper mantle under the volcanic belt of island arc. There are hot-springs within 15 km distance from crater of volcanoes.

According to a plausible model for the migration of H<sub>2</sub>O and the generation of basalt magma in subduction zones, the hydrated peridotite is formed by addition of slab-derived H<sub>2</sub>O beneath the forearc region and should be dragged downward on the slab by the subduction of oceanic lithosphere. Amphibolite and chlorite in the dragged hydrated peridotite layer decomposes to release H<sub>2</sub>O at around 110 km just beneath a volcanic front. When the front of migration of H<sub>2</sub>O from the hydrated peridotite reaches the region with solidus temperature of hydrous peridotite. Partial melting takes place to produce initial magma. Successive addition of H<sub>2</sub>O to the region expands the partial 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 to make a volcanism.

The different two types of volcanic activities with geothermal activities are found at the volcanic belts in the dragged downward slabs of the around 150 and 250 km depths.

Key words : Island-arc, geothermal area, Hot Spring, Southern part of Kyusyu, Sumatra

### 要 約

南九州とスマトラでの温泉や地熱地帯の分布や化学成分に類似性がある。これらは、東北本州やジャワの火山での温泉や地熱地帯の分布と異なる。南九州やスマトラでは火山フロントの

近くに火山フロントと平行に大きな断層系が見られる。その断層系に沿って所々にイグニブライトや厚い溶結凝灰岩（例えば南九州のシラス）の噴出に続いて、石英安山岩や安山岩の火山体をつくる火山活動が見られる。

イグニブライトやシラスの噴出場所には負の重力異常値（約 50 mgal）をもつ大きな（直径が 15-20 km）カルデラが存在することが多い。このカルデラ周辺やイグニブライト・シラス分布域では、掘削すれば広い範囲で高温泉が汲み出される。石英安山岩や安山岩の層状火山の近くでは火口から約 15 km 以内に高温泉が得られている（土木学会, 2001; 西村, 2004）。

海洋プレートが沈み込む場合、沈み込みの深さが 100 km より浅い場合、火山活動は認められないが、沈み込みのスラブの蛇紋岩が脱水し、マントルを通り上昇し地殻上部で地下水と混合して深い断層に沿って高温泉が湧出している。110 km を超えたならば、沈み込んでいるスラブのカンラン岩の角閃石、緑泥石が脱水し、千数百°C 以上の温度を有するマントルを部分溶融し上昇して、更に地殻下部も部分溶融してイグニブライトや溶結凝灰岩の噴出、カルデラの生成それらの活動に伴う地熱活動を起している。カルデラのリムに石英安山岩・安山岩の火山活動とそれに伴う火山周辺の地熱活動が見られる。

南九州では加久藤カルデラ、始良カルデラ、阿多カルデラの活動やそれらの周辺に地熱活動が認められる（露木, 1992）。スマトラでも、同様の活動が大スマトラ断層系沿いに見られる（西村, 1980）。

キーワード：島弧，地熱，温泉，南九州，スマトラ

## 1. はじめに

筆者が大学を卒業後、各地の温泉調査、火山の地質・地球物理の研究にかかわりだしたのは 1955 年ごろであった。桜島の南岳の噴火は 1955 年 10 月 13 日から始まり現在に至っているが、その前年の 5 月霧島観光ホテルの地熱ボーリングを手伝った帰りに桜島に立ち寄り、乗ったバスに東桜島で故吉川圭三（後京都大学防災研究所桜島火山観測所所長）が乗り合わせた。その翌日から数日間桜島に留まり、桜島半周の一級水準測量を手伝った。翌年から南岳の噴火が始まった。1965 年からはほぼ毎年重力および重力鉛直勾配の測定を 1995 年まで続けることとなった（例えば、桜島火山の総合調査研究班, 1975; 全国主要活火山の集中総合観測, 1995）。一方で 1975 年からはインドネシアの火山や地熱活動に興味を持った（例えば、Nishimura ed., 1980）。

海洋プレートの沈み込みの深さと火山活動のタイプを議論したのも、1980 年頃からである。スマトラのカルデラ、温泉や地熱地帯の分布の研究を行ない、南九州との類似性に気づきはじめて、「南九州とスマトラの火山活動と火山」をまとめ、京大防災研究所年報に報告した（西村, 1980）。今回この特集の中に、温泉・地熱活動と海洋プレートの沈み込みの深さの関係をまとめ、南九州の特徴を浮かび上がらせることとした。

## 2. 南九州とスマトラ

### 2.1 南九州とスマトラのテクトニクスの類似性と相違点

高橋 (2000) によると南九州の和達・ベニオフ帯の深さはほぼ 110 km までであり (図 1)、プレートの沈み込みの方向と海溝の伸びの方向は斜交する (平, 2001)。その上、断層に沿う地溝帯が海溝軸とはほぼ平行に存在する。この地溝帯の断層系は雁行していることが多い。その雁行している場所に、カルデラのできる活動がある。霧島火山の大きなカルデラはその最北部で、地熱地帯と重なる (図 2)。その南に始良カルデラがあり、直径がほぼ 20 km で負の重力異常は約 50 mgal である (図 3)。

一方、スマトラでは、Hamilton (1974) によると、和達・ベニオフ帯は北スマトラでは 100~150 km で南スマトラでは少し深く、約 150 km である (図 4)。また、プレートの沈み込みの方向と海溝の伸びの方向とは斜交する。海溝の方向に平行にスマトラ大断層が伸びている。その断層は地表では 15~25 km ごとに雁行するが、雁行するところにカルデラ、地熱地帯が見られる (図 5)。カルデラ

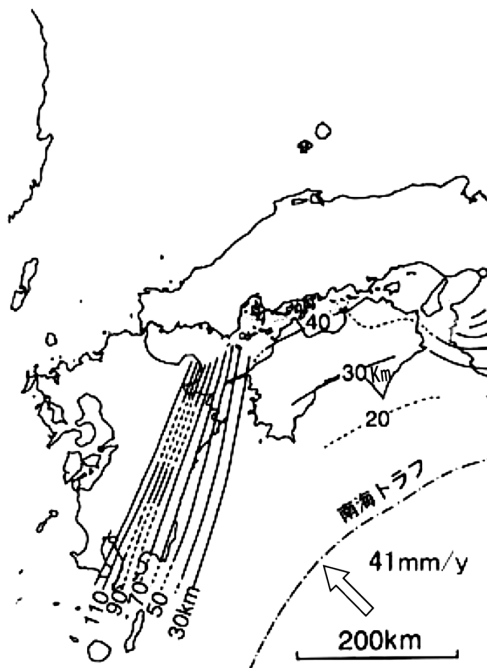


Fig. 1 Distribution of earthquake epicenters indicated the depth of upper part of subduction slab in Kyushu area (modified from Takahashi, 2000). Solid lines indicate the depth of epicenters. Arrow is shown the direction of subduction and its figure is subduction rate (modified from Taira, 2001).

図1 九州地域のフィリピン海プレートの沈み込みにともなう震源の深さの分布(高橋, 2000)および九州近辺のフィリピン海プレートの進行方向(矢印)とその速さ(平, 2001)から編集した。

ラは複数個並んでいることが多い。南九州とスマトラとはこの様によく似た地質構造を有している。

南九州とスマトラの一連の火山活動では、非常に大きな断層系に沿って、断層が雁行して地表に表れているが、その雁行している部分に、まずカルデラを作りながらイグニブライトかシラスを噴出し、その後、カルデラのリムに石英安山岩や安山岩(ソレイアイト系)が成層火山を作る活動をしている。その岩石を分析し、FAM ダイアグラムを示すと同じマグマの分化のトレンド(ソレイアイト系)に乗るが、スマトラのほうが酸性岩が多い(図6)。これはスマトラの地殻が南九州より厚いことによるのかもしれない。岩石中のK, Mgを分析し、 $K_2O$ -MgO ダイアグラムを作成した。これもマグマの分化のトレンドをたどれるものであるが、このトレンドも同じである(図7; 西村, 1980)。

火山活動のある付近には、温泉や蒸気の噴出がみられている。火山やカルデラの配列などにみられる南九州とスマトラの違いは、プレートの沈み込みの速さと、沈み込みと海溝の延びの方向とが斜交している角度の差によるとみられる。

## 2.2 地熱活動の例

南九州の大断層系では、地溝部が生じている。その雁行するところに、北から霧島火山群に囲ま

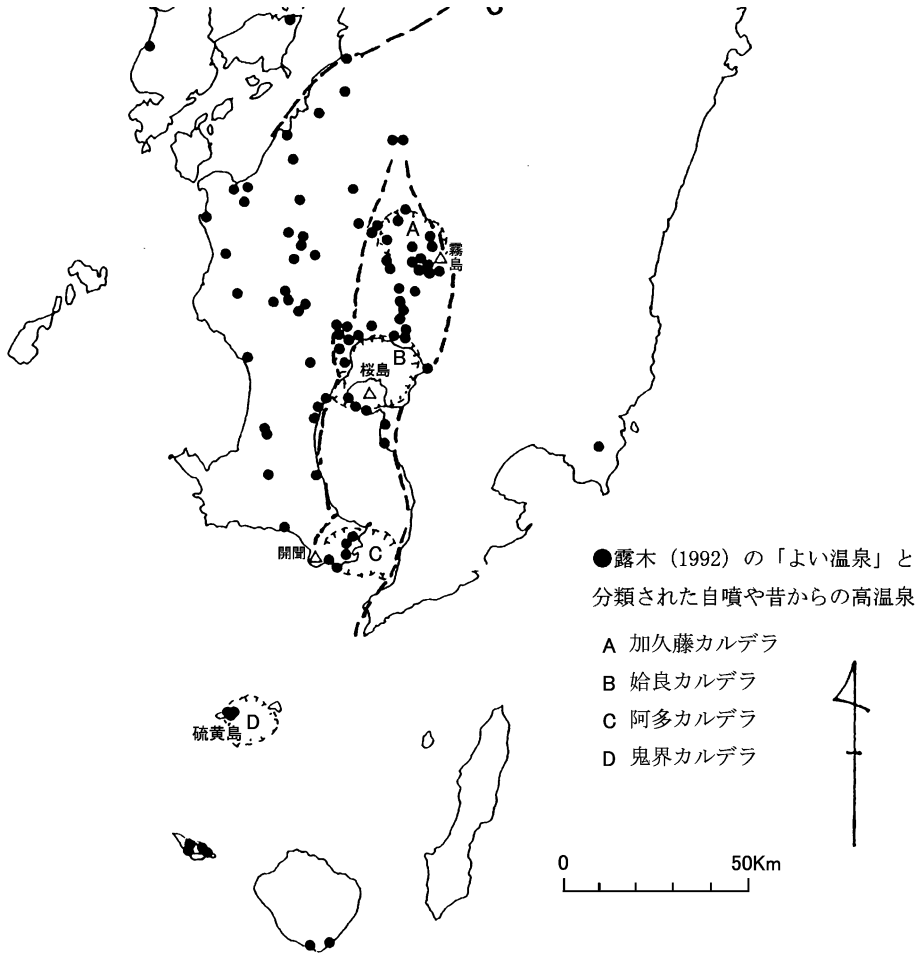


Fig. 2 Distribution of 'natural' hot springs with calderas in Southern Kyushu (modified from Tsuyuki, 1992).

図 2 南九州でのカルデラと自然湧出の温泉分布 (露木, 1995 より).

れて、えびのの噴気帯や霧島温泉群の分布する加久藤カルデラ、西に鹿児島市に点在する温泉と南側の桜島の火山を持つ錦江湾の始良カルデラ、指宿、山川の噴気、温泉を持ち西南隅に開聞岳を持つ阿多カルデラ、硫黄島の火山島・温泉のある鬼界カルデラが存在する (図 2) (Kobayashi, 1988 ; 露木, 1992).

スマトラ断層系では図 5 の断層部分では被害地震が多く発生しているが、雁行する部分にカルデラ、地熱地域や安山岩の火山噴火が見られる。ただ、スマトラでは地殻が南九州より厚い。

両者のいくつかの例をあげる。南九州では北の端に当たる加久藤カルデラの地熱・温泉地帯の化学成分からその生成機構が議論されている (露木, 1992 ; 藤田, 2006)。この結果からマグマと温泉との関係が深いことが示されている (図 8)。

スマトラの南端に近く、スマトラ断層系のセマンカ断層の雁行のところにスオウ (Suwuh) カルデラがあり、噴気が盛んな地熱帯が存在する (図 9 ; Sidarto *et al.*, 1994)。スオウから 25 km スマトラ断層沿いを北西に入ったところにリワ (Liwa) の町があるが、この町ではこの百年の間に震度

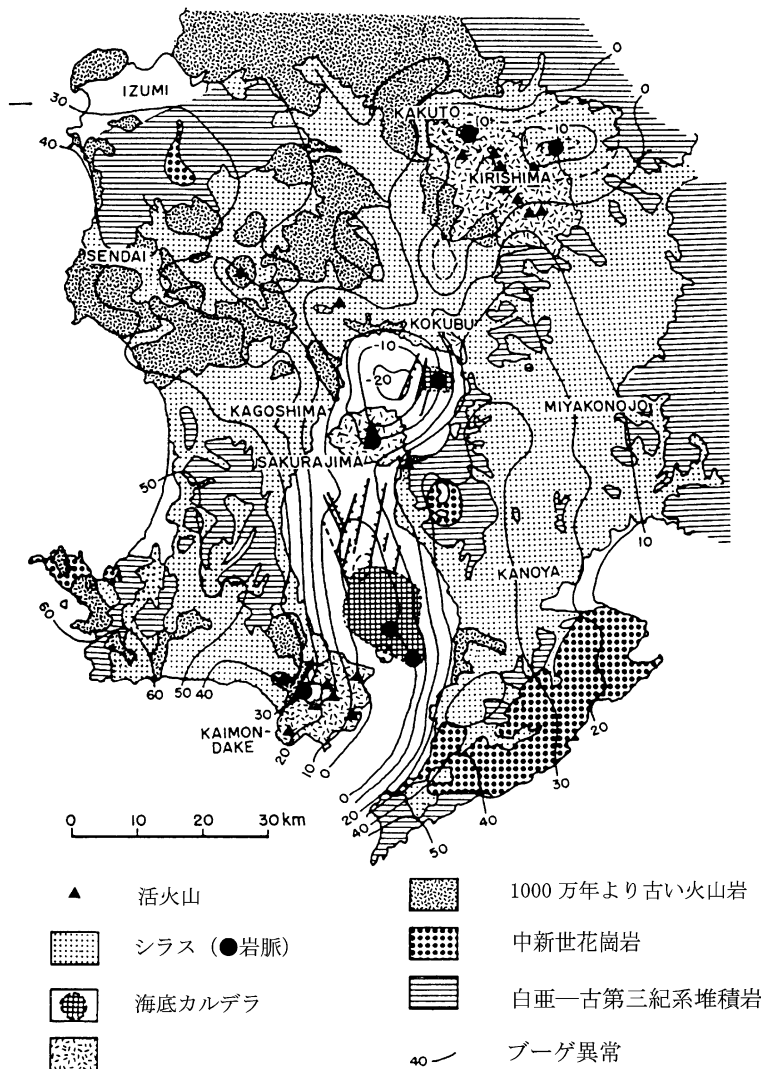


Fig. 3 Generalized geological map and Bouguer anomaly map of Southern Kyushu (Kobayashi, 1988).

図 3 南九州の地質構造と重力異常 (Kobayashi, 1988 より).

7 を示す激甚被害地震が 3 回起こっている。最近では 1994 年 2 月 16 日に起こり、我々は 1995 年から集中観測を行なった (シンクタンク京都自然史研究所, 2000)。その調査の一環として 1995 年にスオウに調査にかけた。温泉は  $\text{SO}_4^{-2}$  型、 $\text{Cl}^-$  型で、マグマと関係が深いことが判った。

### 2.3 南九州とスマトラのマグマ発生機構

沈み込み帯の脱水とマグマの生成機構のモデルを Tatsumi (1989), 巽 (1995) が提案し、それに少し手を加えて議論した (Nishimura, 1997)。図 10 にそのまとめを示す。南九州やスマトラでは海洋プレートのマントルへの沈み込みの深度が 150 km より浅い。この図からは、110 km 深度でカンラン岩の角閃石や緑泥石がその静水圧で脱水し、マントル上部に上昇して、マントルの融点を下げ、

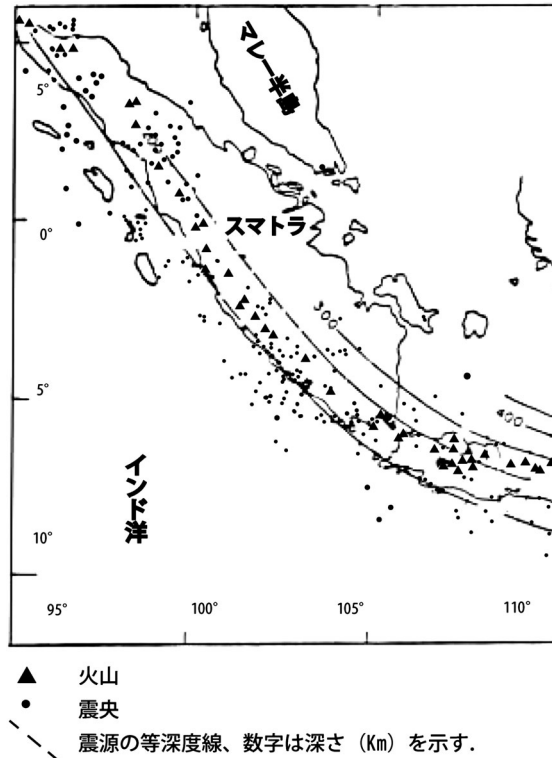


Fig. 4 Distribution of earthquake epicenters indicated the depth of upper part of subduction slab in Sumatra (modified from Hamilton, 1974).

図 4 スマトラのインド洋プレートの沈み込みにもなう震源の深さの分布 (Hamilton, 1974 より).

約 1,300°C 以上のマントルを部分溶融してマグマを作り、地殻中を上昇して、所々でマグマ溜りを作る。地表まで噴出すれば火山フロント近辺の火山作用を起す。そのような火山活動が南九州、スマトラの地熱地帯の生成機構と考えられる。

### 3. 島弧での地熱・温泉

最近では、深く掘削して温泉を得るようになり、地温勾配を利用した温泉もできている。それらを火山性、非火山性温泉と分ける研究者もあるが、古い火山岩と作用してその成分を含み汲み出される温泉はどちらに入れられるのか判断に苦しむ。この議論では火山活動と関係のある温泉とその他の温泉に分けて、火山活動と関係のある温泉について議論を進めたい。

前節で示した図 10 は、島弧の下に沈みこむプレート (スラブ) と火山活動がまとめられたものである。深尾らの全マントル P 波トモグラフィーの解釈を用いると、東北本州弧のように 670 km 深度まで沈み込むプレートはそこで溜まっている (Fukao *et al.*, 1994)。これを模式的に描いた火山活動をプレートとの関係でまとめた図を示す (図 11; Nishimura, 1997)。

これらをまとめると、① 島弧の火山フロントは沈み込みの深さが 110 km の上部に見られる。② 島弧には火山フロント側から、ソレイアイト系火山帯、高アルカリソレイアイト系火山帯、アルカリ玄武岩系火山帯の 3 列が見られる。③ 火山フロントの海溝側には火山活動は見られないが、高温

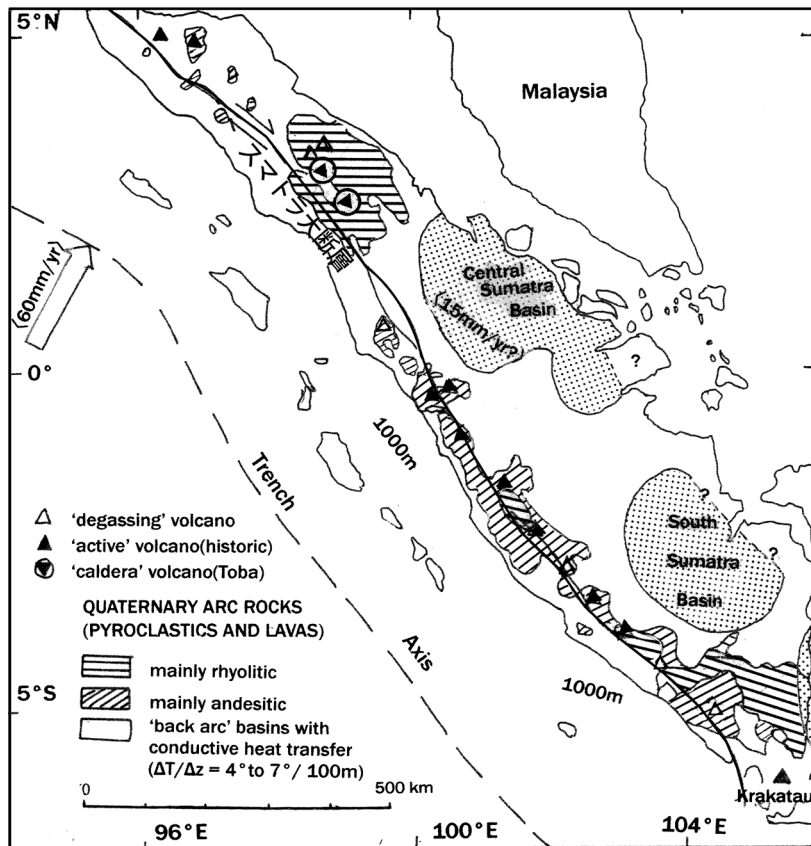


Fig. 5 Volcanic and geothermal areas along Sumatra fault zone (Nishimura, 2000).  
Arrow is shown the direction of subduction and its figure is subduction rate.

図5 スマトラの大スマトラ断層系と火山・地熱地帯の分布。矢印はインド洋プレートの進行方向とその速さ (Nishimura, 2000 より)。

の温泉が見られることがある (西村, 2000a; 2000b; 2001)。

噴火活動は火山フロントでは一連の火山活動の始めにイグニブライトや酸性の溶結凝灰岩 (シラス) の大規模な噴火が起き、負の重力異常を示し直径が 15~20 km のカルデラを作っている。その活動の後、成層火山の噴火が見られる。高アルカリソレイアイト火山系では安山岩の成層火山や蒸気噴火の火山活動、アルカリ玄武岩系では、単成火山やマールの活動が見られる。高温泉はこれらの火口からはば 15 km 以内に見られる (土木学会, 2001; 西村, 2004)。

この他に外帯で火山活動がないのに  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比の高いマントルと関係のある高温泉が見られる。例えば、紀伊半島、四国の前弧側の高温泉は沈み込みプレートが数 10 km 深度で蛇紋岩が脱水してマントルを通り上昇して地殻上部で降雨の地下水と混合して湧出する温泉があることはすでに論じた (西村, 2000a; 2000b; 2001)。

スマトラや南九州などの 100~150 km 深度にまで沈み込んでいるプレートは約 110 km 深度で、カンラン岩でできているプレート表層の角閃石や緑泥石が脱水し、マントル中を上昇すると 1,300°C 以上のマントルの融点を下げ、マントルを部分溶融してマグマを発生し上昇する。地殻まで上昇しマグマ溜りを作る。マグマ溜りの周辺ではマグマ中の成分と熱が上部に伝わり、地殻上部で降雨由

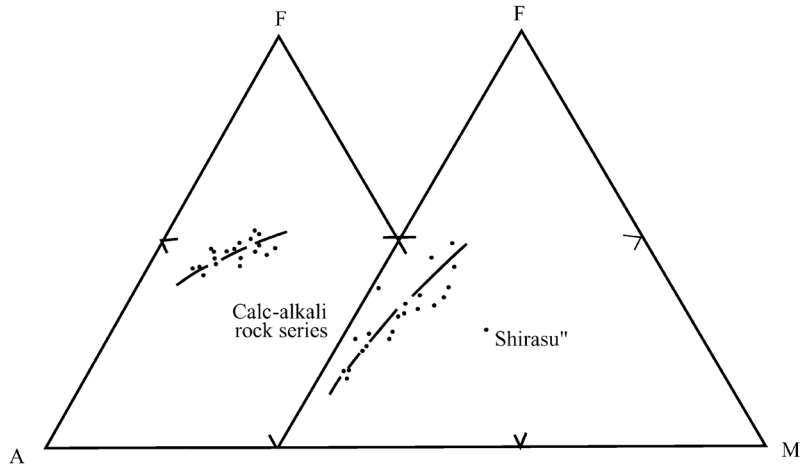


図 6. (a)

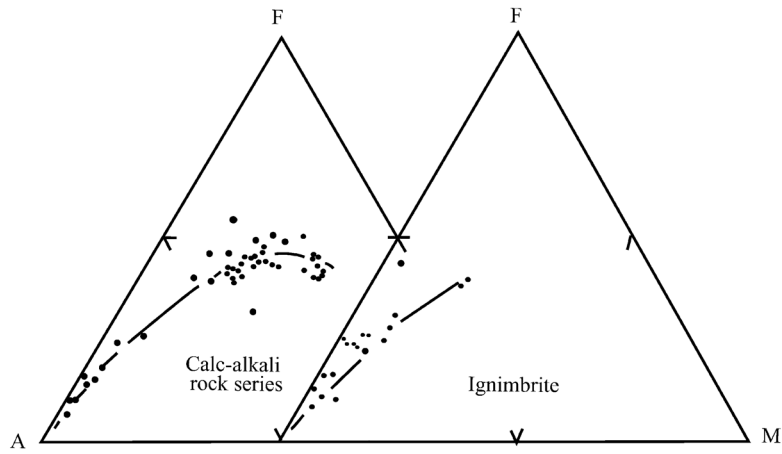


図 6. (b)

Fig. 6 The F-A-M diagrams of volcanic rocks from (a) southern part of Kyushu and (b) Sumatra (Nishimura, 1980).

図 6 (a) 南九州の第四紀火山岩の F (FeO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)-A (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O)-M (MgO) 図.  
(b) スマトラの第四紀火山岩の F-A-M 図.

来の地下水と混合して、火山フロント近くの火山周辺で汲み出される温泉がある。

沈み込みのプレートが 200 km 程度以上沈み込んでいる場合には、150 km 深度でカンラン岩中の金雲母から脱水してマグマを生じ、同じように地熱・温泉が火山近辺で汲み出される温泉群が存在する。

300 km より深いところまで沈みこんでいるプレートでは、エクログイトから脱水する 3 列目のアルカリ玄武岩系のマグマの火山活動とそれに伴う地熱・温泉が見られる。東北本州弧や中部ジャワより西のスンダ弧がこの様な場所である (Nishimura, 1997)。



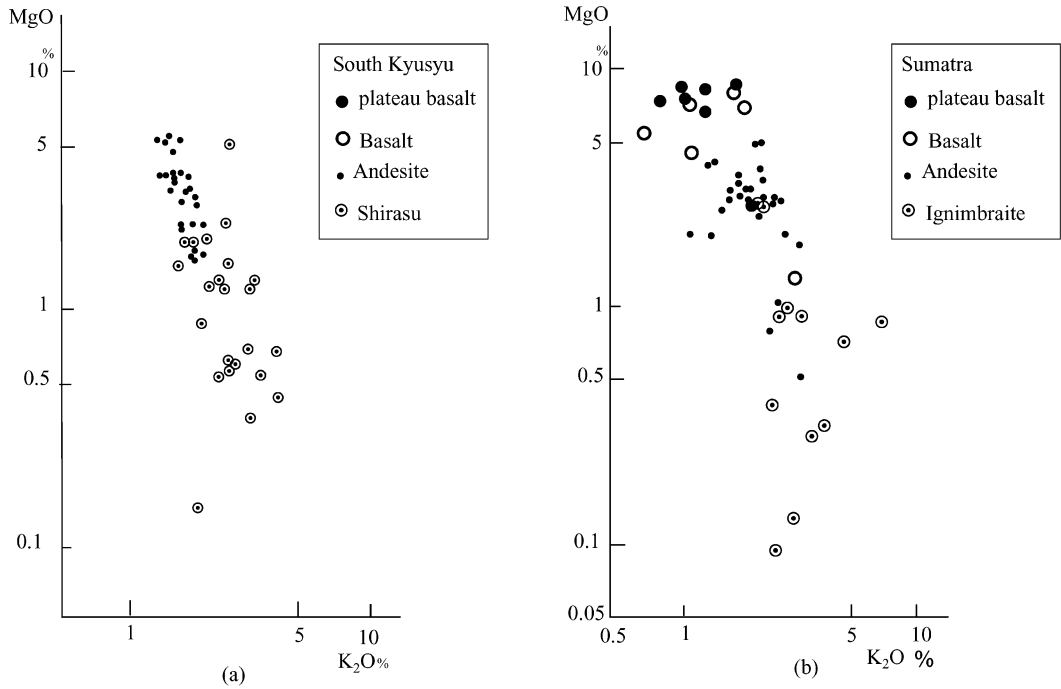


Fig. 7 The K<sub>2</sub>O-MgO diagrams of volcanic rocks from (a) southern part of Kyushu and (b) Sumatra (Nishimura, 1980).

図 7 (a) 南九州の第四紀火山岩の K<sub>2</sub>O-MgO 図. (b) スマトラの第四紀火山岩の K<sub>2</sub>O-MgO 図.

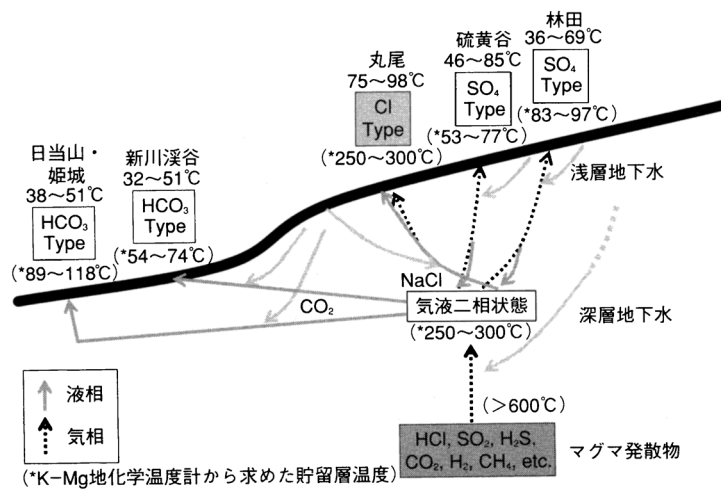


Fig. 8 The model of geothermal genesis, in Kirishima area (Fujita, 2006).

図 8 南九州の地熱・温泉の一機構モデル (藤田, 2006).

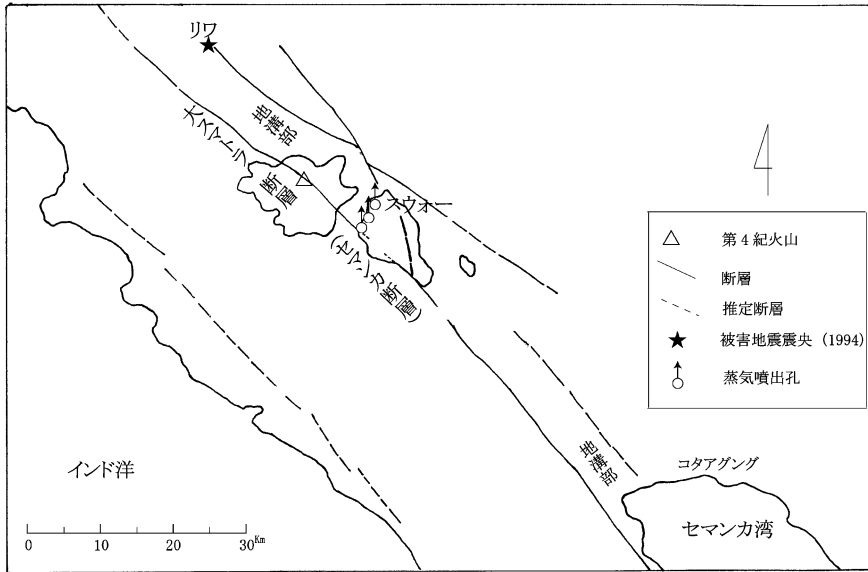


Fig. 9 Geological sketch map around Suwoh and Liwa (modified from Sidarto *et al.*, 1994).

図 9 南スマトラの大スマタラ断層系のカルデラにともなう地熱地域(スオウ)と被害地震(1994)の震央(リワ)(Sidarto *et al.*, 1994を参考に作成した)。

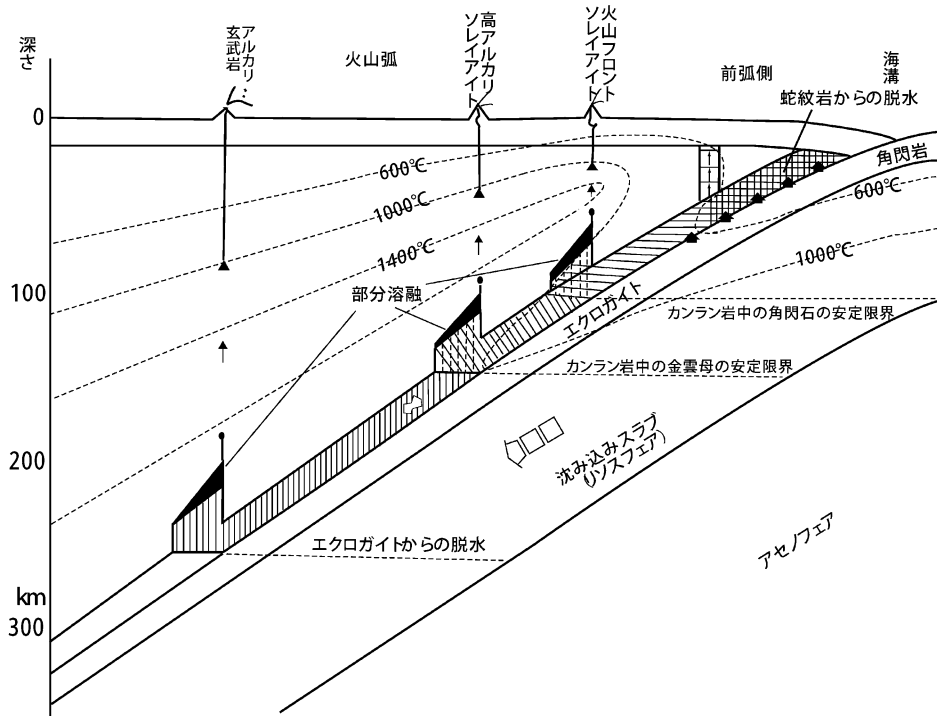


Fig. 10 A plausible model for migration of  $H_2O$  and the generation of basalt magmas in subduction zones (modified from Tatsumi, 1989).

図 10 沈み込みスラブの脱水モデル。前火山フロントでの温泉、ソレイアイト系、高アルカリソレイアイト系、アルカリ玄武岩系の生成モデル (Tatsumi, 1989を参考にまとめた)。

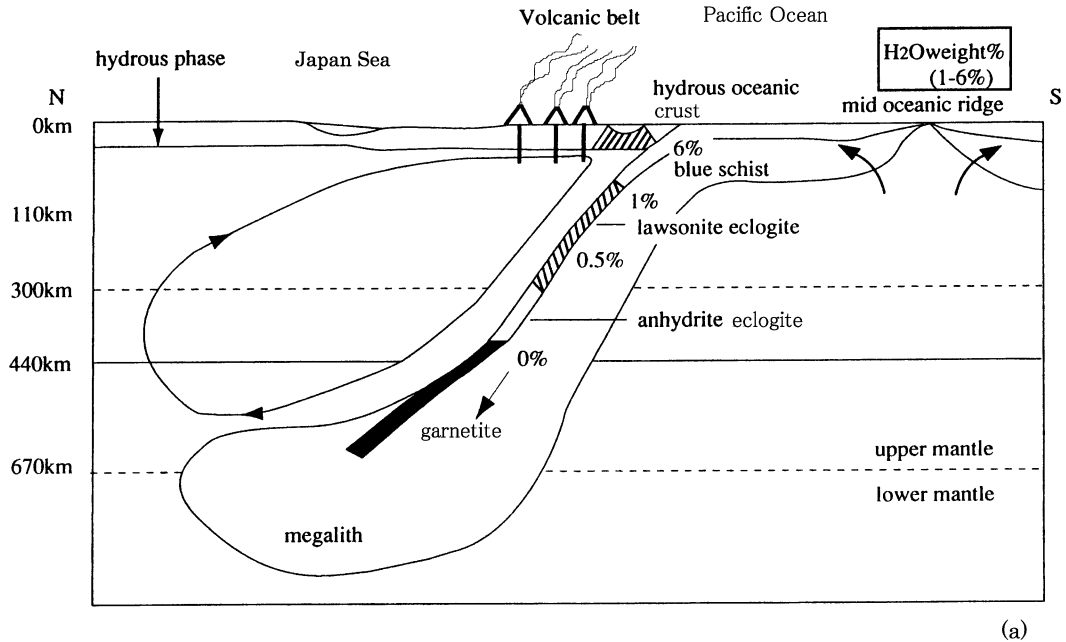


Fig. 11 A model of subduction system across Tohoku area, Japan (modified from Nishimura, 1997), using Plume Tectonics conducted by Fukao *et al.* (1994).

図 11 Fukao *et al.* (1994) の全マントル P-波トモグラフィの結果をもとに沈み込み帯のマントル内でのモデル東北日本弧を例にまとめた概念図 (Nishimura, 1997).

#### 4. まとめ

南九州とスマトラの断層活動と火山、地熱・温泉活動に類似性が見られる。このような類似性を示す活動は、沈み込む海洋プレートで発生する地震が 150 km 以浅であること（筆者はこれを沈み込むプレートが 150 km に先端が到達したばかりであると解釈している；Nishimura, 1997）と島弧の延長方向と斜交する沈み込み帯（Oblique subduction zone）であることに起因している。

南九州とスマトラではそれぞれ脊梁山脈に平行に大断層系が走り、地表では断層系が雁行している。雁行しているところに厚い酸性の溶結凝灰岩（シラス）やイグニブライト（ignimbrite）を噴出した負の重力異常をもつカルデラを作り、その縁に安山岩を主体とする成層火山を作る。その周辺に地熱・高温泉湧出地帯ができています。

#### 文 献

土木学会（2001）：概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方，土木学会，東京。

Fukao, Y., Maruyama, S., Obayashi, M. and Inoue, H. (1994) : Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography, Jour. Geological Society, Jap., **100**, 4-23.

藤田俊一（2006）：酸性硫酸塩泉ができる仕組み，大沢信二編「温泉科学の新展開」，45-73，ナカニシヤ出版，京都。

Hamilton, W. (1974) : Earthquake Map of the Indonesian Region, 1 : 5,000,000, USGS, Map I-875-C.

Kobayashi, T. (1988) : Tectonic Setting and Major Pyroclastic Eruption in Southern Kyushu,

- A guide book for Sakurajima Volcano, Organizing Committee Kagoshima International Conference on Volcanoes, 1-6, July 19-23, 1988, Kagoshima.
- Nishimura, S. (1997) : Report of the Review of Topical Report on Volcanology of the Siting Studies at Muria Peninsula, Indonesia, 30 p, International Atomic Energy Agency, Project INS/9/012, April 22, 1997. Venna.
- Nishimura, S. ed. (1980) : Physical Geology of Indonesian Island Arcs., 239 p, Kyoto Univ., Kyoto.
- 西村 進 (1980) : 南九州とスマトラの火山活動と火山, 京大防災研年報, **23**, B-1, 1-19.
- 西村 進 (2000a) : 紀伊半島における前弧火成作用と温泉, 温泉科学, **49**, 207-216.
- 西村 進 (2000b) : 四国北部の地質構造と温泉, 温泉科学, **50**, 113-119.
- 西村 進 (2001) : 紀伊半島の温泉とその熱源, 温泉科学, **51**, 98-107.
- 西村 進 (2004) : 火山活動と温泉のかかわり合い, 西村 進編「温泉科学の最前線」, 127-138, ナカニシヤ出版, 京都.
- 桜島火山の総合調査研究班 (1975) : 桜島火山の総合調査報告 (昭和 49 年 12 月~昭和 50 年 3 月), 88 頁, 鹿児島.
- Sidarto, T.C.A., Santosa, S. and Gunawan, W. (1994) : Geology of the Kotaagung Quadangle, Sumatera, 1 : 250,000 Explanatory note and geological map, Geological Research and Development Centre.
- シンクタンク京都自然史研究所 (2000) : 平成 11 年度環境事業団地球環境基金助成金活動報告書「インドネシア ジャワ・スマトラにおける火山・地震活動の地下水への影響調査と地下水保全に関する活動」平成 12 年 3 月, 154 頁, 京都.
- 平 朝彦 (2001) : 地球のダイナミクス, 地質学 1, 岩波書店, 東京.
- 高橋正樹 (2000) : 島弧・マグマ・テクトニクス, 東大出版会, 東京.
- 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, 186 頁, 東大出版, 東京.
- 露木利貞 (1992) : 九州における温泉と地質—鹿児島島の温泉を中心として—, 露木利貞教授退官記念会, 115 頁, 鹿児島.
- 全国主要火山の集中総合観測 (1995) : 第 8 回桜島火山の集中総合観測 (平成 3 年 10 月~平成 4 年 3 月), 140 頁, 鹿児島.