

## 2. 南九州の地質・地質構造と温泉

### Geology, geologic structure, and hot springs in southern Kyushu, Japan

小林哲夫<sup>1</sup>, 矢野 徹<sup>2</sup>

(平成 19 年 6 月 13 日受付, 平成 19 年 6 月 14 日受理)

<sup>1</sup> 鹿児島大学理学部地球環境科学科 〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-35

<sup>2</sup> 鹿児島県警察本部 〒890-8566 鹿児島市鴨池新町 10-1

Tetsuo KOBAYASHI<sup>1</sup> and Toru YANO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Earth and environmental Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University  
1-21-35, korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan

<sup>2</sup> Kagoshima Prefectural Police 10-1, Kamoike-shinmachi, Kagoshima 890-8566, Japan

#### Abstract

The geology, geologic structure, and hot springs in southern Kyushu are discussed in this paper. The basement rocks of this area are composed mainly of the sedimentary complexes of the Shimanto Terrane which is divided into two groups : Cretaceous Northern Shimanto Terrane and Tertiary Southern Shimanto Terrane. The graben structures in southern Kyushu have been formed in relation to the opening of the Okinawa Trough since ca. 10 Ma, and followed by contemporaneous volcanism. Volcanism was most active in between 4 Ma and 2 Ma which formed the fundamental graben structure such as Hokusatsu Triangular Graben, Hitoyoshi basin, and Kagoshima Graben. Since 2 Ma, the volcanism within the Kagoshima Graben became most active involving at least three calderas : Ata, Aira, and Kakuto calderas from south to north. Active volcanoes also exist in this graben, indicating an active volcano-tectonic depression.

Most hot springs in southern Kyushu are distributed in these grabens, suggesting an intimate genetic relation between volcanism and hot springs. The heat supply of the hot springs from the basement rocks is sourced not only from the present magma, but also from Tertiary granites.

Key words : Shimanto Terrane, Kagoshima Graben, Hokusatsu Triangular Graben, Okinawa Trough, hot spring

#### 要 旨

南九州の地質・地質構造の形成と温泉の関係を概観した。南九州の基盤岩類は主に四万十累層群であり、白亜紀の北帯と第三紀の南帯に二分される。南九州の地溝構造は、10 Ma 以降の沖縄トラフの形成・拡大と関連して形成された。断裂運動の進行につれ火山活動も活発化し、特に 4 Ma~2 Ma は火山活動が最も激しく、かつ広域にわたっていた。その過程で北薩三角地溝や人吉盆地、さらには鹿児島地溝の原形が形成された。2 Ma 以降は鹿児島地溝内部での火山活動が活発であり、南から阿多、始良、加久藤カルデラ等が噴火を繰り返した。また活火山も地溝内に存在しており、鹿児島地溝は現在でも活動的な火山構造的な地溝である。

温泉の大半は鹿児島地溝と北薩三角地溝の内部に分布しており、温泉が火山活動の熱と密接な成因関係にあることを示している。また基盤岩から湧出する温泉の熱源も、現在のマグマか

あるいは近隣の熱を帯びた深成岩体と推定される。

キーワード：四万十帯、鹿児島地溝、北薩三角地溝、沖縄トラフ、温泉

## 1. はじめに

南九州という範囲には、九州山地以南から沖縄県までが含まれるであろうが、温泉は主に鹿児島県に集中しているため、本論では主に鹿児島県内の地質を対象として記載する。ただし琉球弧全体の地質構造などを議論する時には、沖縄県までを含めている。

南九州の基盤岩は主に四万十累層群および深成岩類（花崗岩類）からなり、その基盤岩に発達した断裂、地溝帯を埋めるように火山噴出物や堆積岩が分布している。また島弧方向に沿って、多くの活火山も分布している。火山活動が活発なこともあり、鹿児島県には多くの温泉が点在し、泉源数、湧出量、温泉利用施設のどれをとっても、全国屈指の温泉県といえる（黒川，1997）。露木（1992）は、九州地域における温泉の地質学的研究の総括を行っているが、本論では、それ以降に明らかとなった地質学上の知見を加えまとめたものである。

## 2. 南九州の地形と地質概説

南九州から台湾までの1,000 km以上にわたる地域は、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う島弧系をなしている。最も海溝側には、種子島・奄美大島・沖縄本島・宮古島・石垣島など基盤岩からなる島々の列が並び、その背弧側には活火山、さらに沖縄トラフが配列している（Fig. 1）。この帯状配列を断ち切るように、トカラ海峡と慶良間海裂（宮古凹地）という大規模な横ずれ断裂帯が存在する（小西，1965）。このような断裂構造は、沖縄トラフの形成と関連して生じたものと推定される。

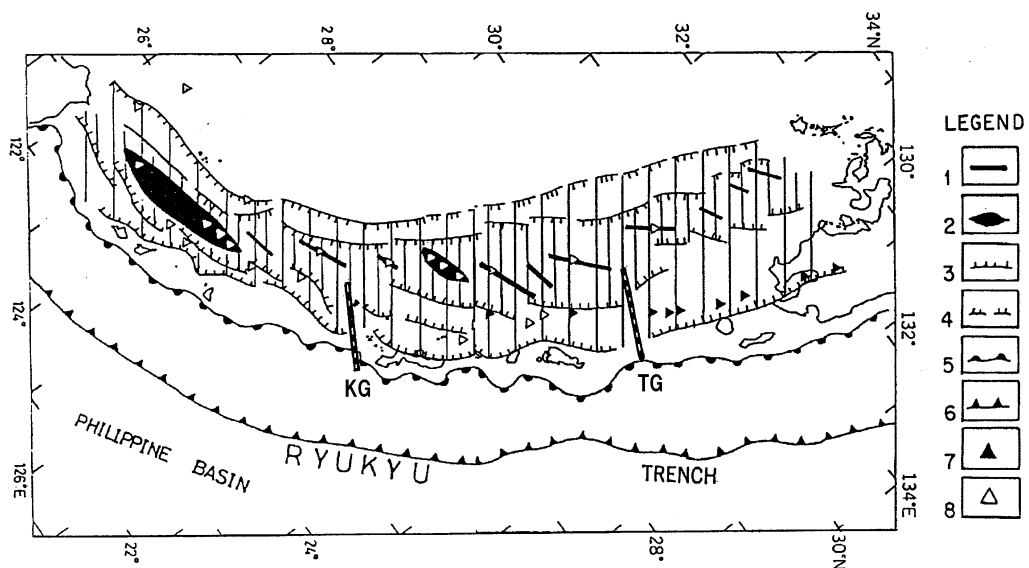


Fig. 1 Geologic and structural map of the Ryukyu arc, Okinawa Trough, Taiwan and vicinity (modified from Kimura, 1985). Legend 1 : central graben, 2 : basin occupied by Pleistocene igneous intrusions, 3 : major fault and fault scarp, 4 : buried major fault and fault scarp, 5 : eastern boundary of the Ryukyu Ridge, 6 : trench, 7 : active volcanoes, 8 : submarine intrusions or volcanoes since Late Pleistocene time, TG : Tokara Gap, KG : Kerama Gap.

Fig. 2 は南九州で最も顕著な地形である鹿児島地溝 (露木, 1969) を中心に, 盆地や平野の位置と簡略化した地質分布を示す, 基盤岩類 (三畳系~第三系) は北薩地方を中心に, 折れ曲がったような分布をしており, 北薩の屈曲 (橋本, 1962) とよばれている. そこから北東方向には急峻な山々が連なり, 九州山地となっている. しかしその南山麓の一角には, 山地を引き裂いたような形で人吉盆地が存在している. 鹿児島地溝は幅が 20~30 km で, ほぼ南北方向に連なっている. この地溝の西側, 北薩地域には, 主に鮮新世の火山岩類が広域に分布し, その火山の間の窪地を満たすように湖成層が堆積している. 類似した堆積物は薩摩半島の南端部にも分布している. 鹿児島地溝内には, 南から阿多カルデラ, 始良カルデラ, 加久藤カルデラ, その他の埋積カルデラ等が存在しており, 活火山の大半も地溝内に分布している. それゆえ鹿児島地溝は, 全体としては活動的な火山構造性地溝とみなせる. 最近の数 10 万年は, 鹿児島地溝内部のカルデラでの大規模火砕流噴火も頻発しており, 南九州全域に広大な火砕流台地が形成されている.

### 3. 南九州の基盤構造の形成

#### 3.1 南九州のテクトニクス変遷

南九州で特徴的な基盤構造は, 北薩の屈曲と鹿児島地溝等の地盤の断裂構造である. まず北薩の屈曲であるが, 日本海の拡大の時期 (15 Ma) に, 北薩地域を境に北側が時計回りに回転する変動に

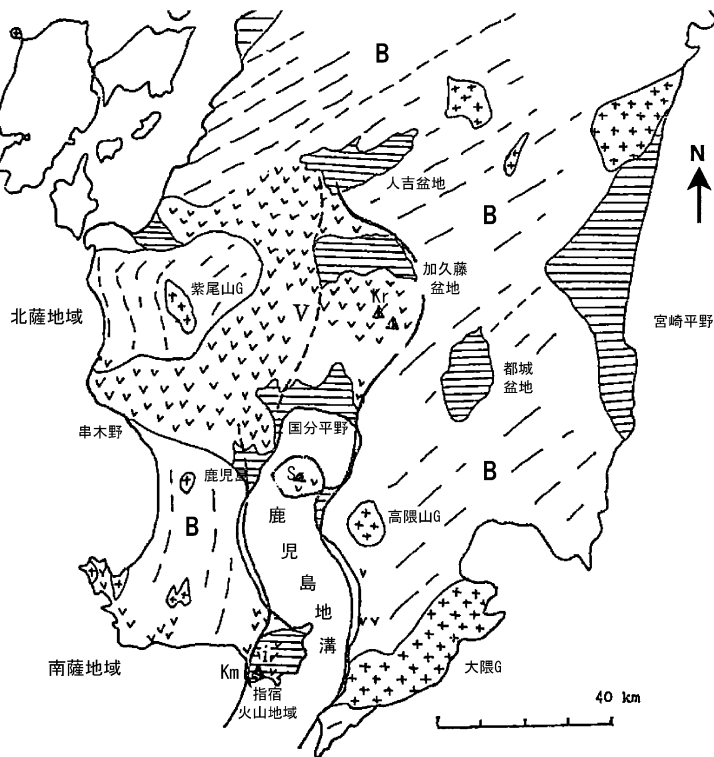


Fig. 2 Geologic sketch map of southern Kyushu indicating the distribution of Kagoshima Graben (modified from Tsuyuki, 1969). B : Basement sedimentary complexes of the Shimanto Terrane and the Chichibu Terrane of Triassic to Tertiary ages, G : Tertiary granitic rocks, V : volcanic rocks, Kr : Kirishima volcano, S : Sakurajima volcano, Km : Kaimondake volcano,

より生じたものである(鳥井ら, 1985). しかしその中心付近に位置する紫尾山花崗岩には回転の影響が認められない(米田・岩松, 1987). そのため, 回転は 15 Ma 以降, 花崗岩の貫入・固結までの間に生じたものと推定される. ちなみに海溝側の花崗岩類の年代はすべて約 14 Ka (柴田, 1978) であり, 紫尾山花崗岩の形成年代もほぼ同じ値である (13.6 Ma : 河野・植田, 1966).

鎌田・小玉 (1993) は, 沖縄トラフは 10 Ma ころに形成されはじめ (三木, 1991), その後 6 Ma 前後に南九州全体が反時計回りに 30 度ほど回転する大きな変動が発生したと考えた. Fig. 3 は沖縄トラフ形成年代と, それに伴う地盤の変位を示している. しかし Kodama *et al.* (1995) は, 回転運動の発生時期を 2 Ma 以降に修正した. その後の知見を加え, Kamata and Kodama (1999) は沖縄トラフ主部の拡大を 6 Ma~2 Ma, 沖縄トラフ北部の拡大と南九州の回転運動を伴うリフティングの発生を 2 Ma 以降の現象とした. どの解釈が正しいかを議論するデータはないが, 南九州における火山活動や地溝形成等の地形発達を考慮すると, 鎌田・小玉 (1993) による年代の方が諸現象をうまく説明できそうである. そのため本論では, 顕著な事象の発生年代等については鎌田・小玉 (1993) を参考にした.

沖縄トラフの形成とほぼ同時期に, 南九州一帯では広域的な地殻変動がおり, また同時に火山活動も活発化した. 特に 6 Ma 以降の地殻変動 (回転運動を含む) では, 南九州地域に多くの断裂や

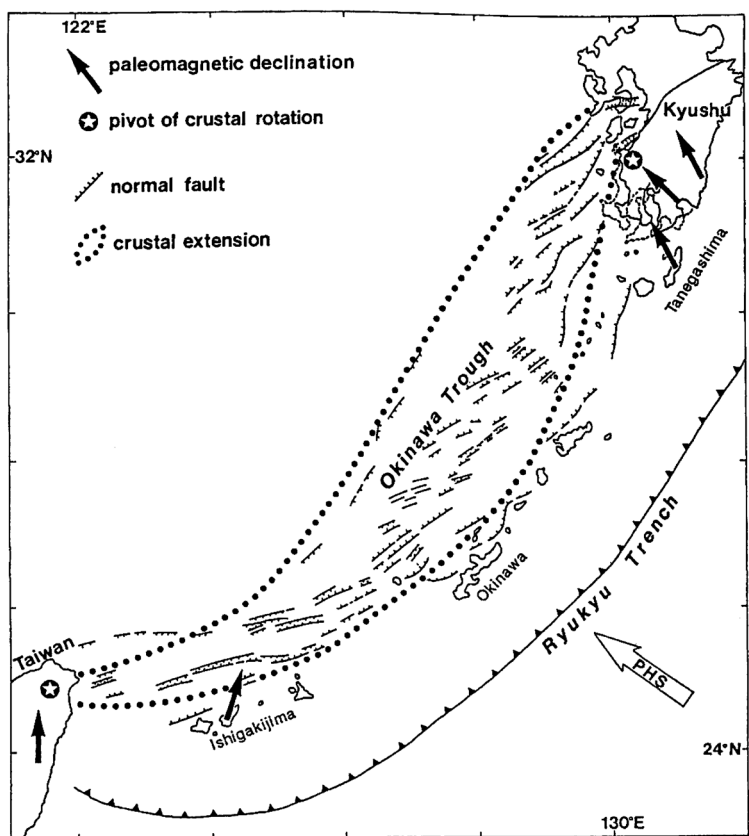


Fig. 3 Distribution of crustal extension of Okinawa Trough and associated paleomagnetism (after Kamata and Kodama, 1993). Open arrow with PHS shows the present subduction direction of the Philippine Sea plate.

地溝構造を形成した。

### 3.2 北薩の断裂地形(地溝)の形成

鹿児島地溝とは別に、鹿児島から北西方向の串木野に向かって断層が走っており、宇都ら(1997a)は串木野-鹿児島断層(鹿児島構造線:Arita, 1954)と呼んでいる(Fig. 2 参照)。この断層の北側は大きく陥没し、火山活動を伴う堆積盆となっている。反対側に対の断層がないため、宇都ら(1997a)はハーフグラベンとみなしているが、境界付近は火山岩・堆積岩類に埋積されており、断層の有無は地表調査では確認できない。

埋没した基盤岩の深度分布を調べる目的で、県内の温泉掘削ボーリングのデータを整理した。掘削データは温泉台帳として、県庁生活衛生課に一括保管されている。温泉の帯水層が浅い地域では、基盤岩に到達する前に掘削を終えており、基盤岩の記載がある資料は、520 箇所中 108 箇所だけであった。ただし特定地域に多数のデータがある場合には代表例を 1 つ選定した。

Fig. 4 は、上記した方法で選定された 42 箇所のボーリングデータを点示し、等深度線を描いたものである。ただし温泉ボーリングだけでは全域をカバーできないため、広域探査のデータも括弧つ

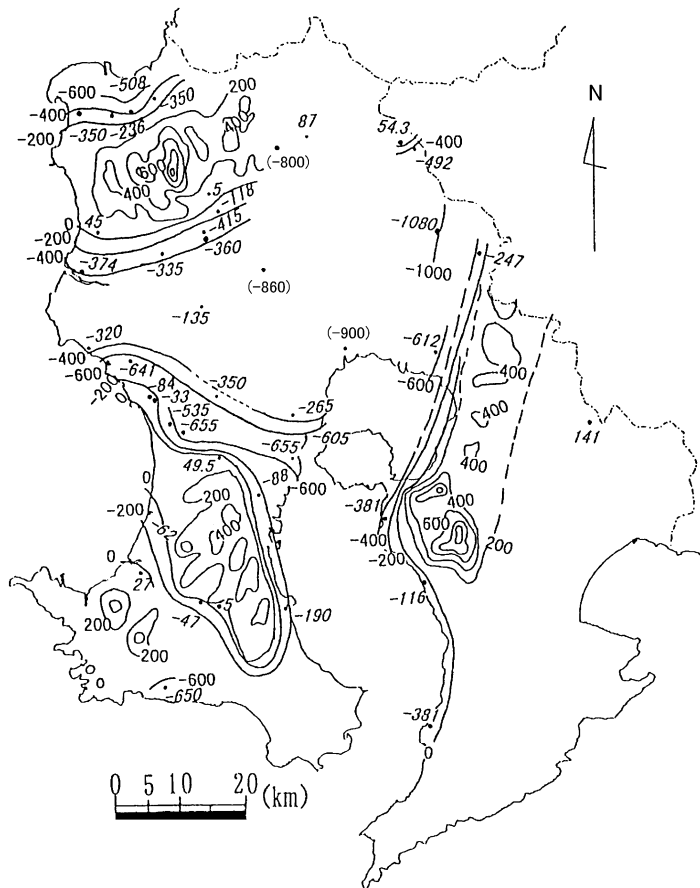


Fig. 4 Contour line map of the basement rocks in southern Kyushu based on drilling data for hot springs. Figures in parentheses from Kubota (1986) and Agency for Natural Resources and Energy (1988). H : Hokusatsu Triangular Graben, K : Kagoshima Graben.

きで追加した。その結果、1) 鹿児島湾の延長に当たる牧園町、佐賀利山周辺では基盤深度が深いこと、2) 伊集院地域と東市来地域の間では、串木野-鹿児島断層により北東側がステップ状に落ち込んでおり、小規模ながら地溝状の構造が存在すること等が判明した。北薩地域の中心部では浅所から湧出する温泉が多いため、基盤岩まで達したデータはないが、広域探査によるボーリングでは-860 m 以深というデータがある。

北薩地域の構造については、ハーフグラベンではなく、Fig. 5 に示すようにコールドロンの密集地域（久保田，2006）との考えもある。“コールドロン”とした部分は、負の重力異常を示す部分と一致している。北薩地域にはたくさんの負の重力異常を示す地域が存在し、また宮崎層群中に挟在する多数の凝灰岩層の起源地域（鳥井ら，2000）と推定されるため、カルデラ状の構造が存在することは確かであろう。宇都ら（1997a）がハーフグラベンとした根拠は、地表に断層が存在しないためであるが、基盤岩の分布高度は地層境界付近で大きく食い違っており、久保田（1986）が指摘したように断層の存在を想定せざるをえない。埋没した基盤岩には地塁状の突出部も存在するであろうが、全体としてはかなりの深度をもつ堆積盆であることは確かである。それゆえ北薩地域は鹿児島地溝ほど明瞭な地形的特徴を示さないが、火山構造性の陥没地形とみなすべきであろう。この特徴をより鮮明に表現するため、本論ではこの地域を北薩三角地溝と仮称する。Fig. 6 はこれら地溝状構造の概略図（A）と、鹿児島地溝の東西断面（B：早坂，1982）である。Fig. 6（A）には、北薩三角地溝と鹿児島地溝の位置関係、また鹿児島地溝中のカルデラおよびカルデラ状構造の分布を示し、Fig. 6（B）には、鹿児島地溝が中央部にむかって階段状に落ち込んだ状態を示している。

北薩三角地溝中には活火山は存在しないが、隣接する鹿児島地溝は現在も活動的な火山構造性地溝であり、鹿児島湾を北上し加久藤盆地から人吉盆地にまで達している。しかし人吉盆地には顕著な火山活動が認められないため、人吉盆地自体は鹿児島地溝に含まれていないようである。たとえば鹿児島地溝を提唱した露木（1969）でも、人吉盆地を含めるべきかについては言及していない。また向山ら（1984）も明確に記載してはいるが、論文（Fig. 5）を見るかぎり、鹿児島地溝を加久

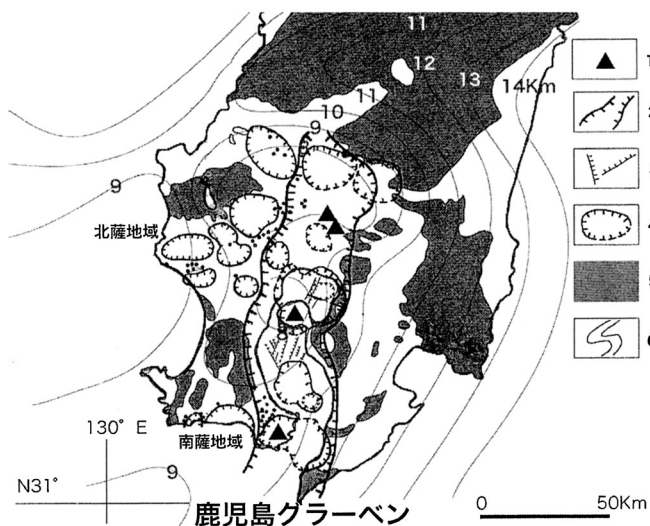


Fig. 5 Distribution of the Kagoshima graben, caldera structure, and Curie point depths in southern Kyushu (modified from Kubota, 2006). 1 : active volcano, 2 : graben, 3 : fault, 4 : caldera and estimated caldera, 5 : Cretaceous to Tertiary basement rocks, 6 : Curie point depth (contour interval is 1 km).



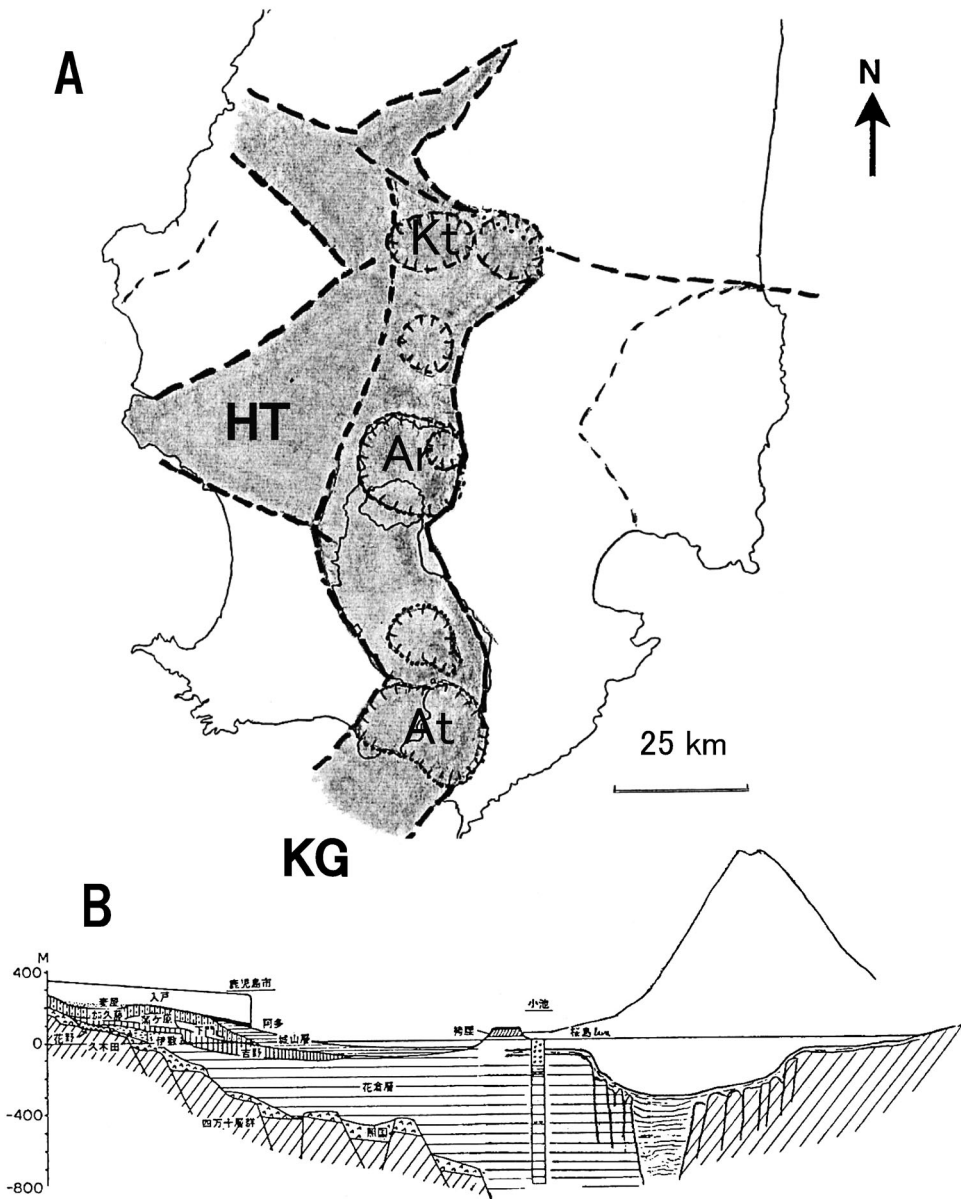


Fig. 6 Distribution of graben in southern Kyushu (A) and the E-W cross section of the Kagoshima Graben (B : Hayasaka, 1982). HT : Hokusatsu Triangular Graben, KG : Kagoshima Graben, Kt : Kakuto caldera, Ar : Aira caldera, At : Ata caldera..

藤盆地までとしている。久保田 (2006) も基本的に同じ考えである。一方、宇都ら (1997a) は、鹿兒島地溝は桜島火山付近で消滅するとみなしており、人吉盆地の成因には触れていない。彼らの考えは Koto (1916, p. 18) の見解と似ている。

このように人吉盆地を鹿兒島地溝に含めると明言した論文はない。しかし人吉盆地や隣接する大口盆地も、一連の断層運動によって生じた陥没構造とみなせる。人吉盆地内の人吉層中の凝灰岩か

らは 2.7 Ma と 2.6 Ma (鳥井ら, 1999) の年代が得られている. それゆえ盆地構造は, 3 Ma ころには出現した可能性がある. 鹿児島地溝の形成開始は約 3 Ma (後述) と推定され, 人吉盆地の形成開始も同時代であれば, 人吉盆地は断裂の初期段階で拡大が停止した地溝の一部とみなせる.

北薩三角地溝と鹿児島地溝の形成関係については, 今のところ明確な証拠は得られていない. 多少の時代差はあるかもしれないが, 活動期間はかなり重複していたのではないかと推定される. しかし 1 Ma 以降は, マグマの供給経路は鹿児島地溝に限定されてきているのであろう.

#### 4. 南九州の地質

Fig. 7 および Table 1 に, 南九州の地質図と地質層序表を示す. 主な対象は鹿児島県内の地質であるが, 離島部分の地質および最近 100 万年間の火山噴出物や地層については表記が煩雑になるため, 本文中に記載するにとどめた.

南九州の基盤岩の大部分は, 白亜紀以降に形成された付加体である四万十累層群からなる. その外側にはさらに古い秩父帯が分布しており, 両者は仏像構造線によって画されている. 秩父帯の南縁部には, ジュラ紀末~白亜紀最前期の付加体である三宝山付加コンプレックスが分布している. 一方, 鹿児島の北西部, 甕島から天草にかけての地域にも, 四万十累層群とほぼ同時代の白亜系(御所浦層群と姫浦層群)が分布するが, それらは背弧側の海盆に堆積したものである.

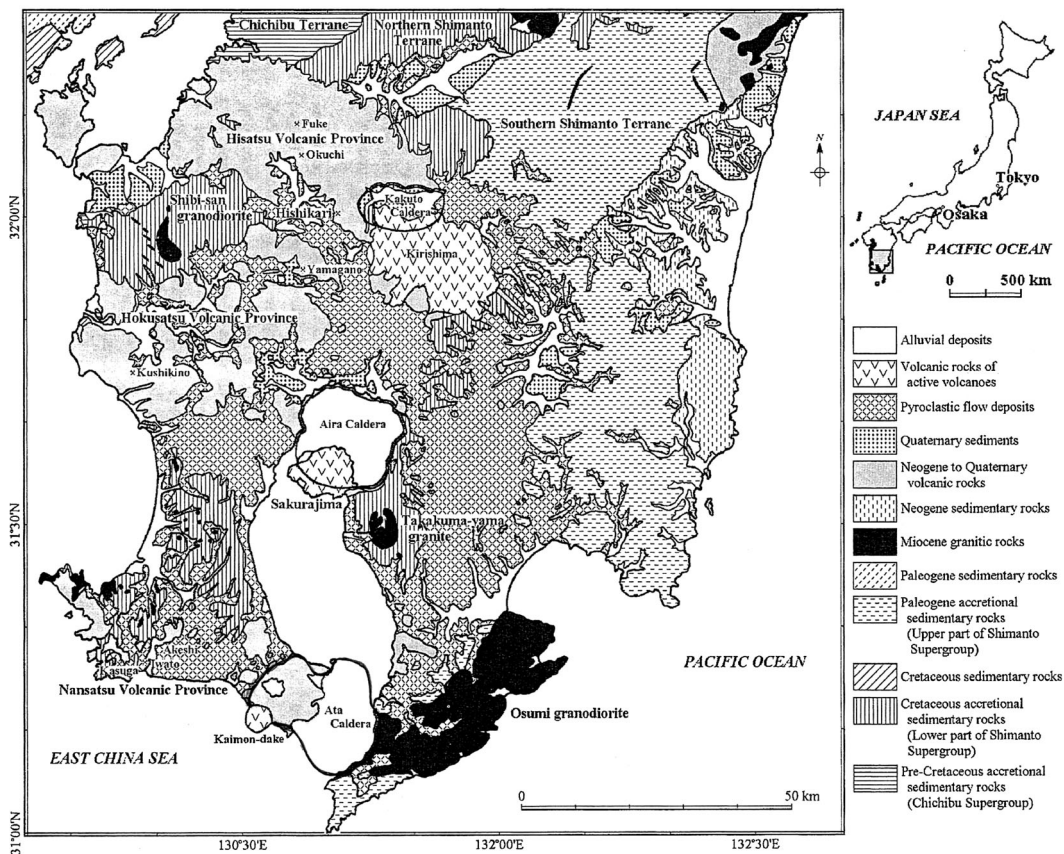


Fig. 7 Geologic map of southern Kyushu (modified from Yamamoto *et al.*, 2003).



Table 1 Summary of the geology of southern Kyushu.

第四紀		更新世	(Ma) 前期 (1.7-0.74)	南薩・北薩新期火山岩類	花倉層 国分層群
		第三紀	鮮新世	後期 (3.4-1.7)	南薩・北薩中期火山岩類
前期 (5.3-3.4)	南薩・北薩古期火山岩類				
後期 (10.5-5.3)					
中新世	中期 前期 (24-10.5)		花崗岩類 (14-12)		
古第三紀			(65-24)	四万十南帯	日向亜層群
				四万十北帯	蒲江亜層群 佐伯亜層群
白亜紀			(146-65)	秩父帯 (三宝山帯)	
ジュラ紀			(245-146)		

4.1 基盤岩類

本論では、まず基盤岩の大部分を占める四万十累層群について記述する。Fig. 8 は南九州における四万十累層群の分布図(寺岡, 2004)である。四万十累層群は時代および岩相により、白亜紀の下部四万十層群(四万十帯北帯)と第三紀の上部四万十層群(四万十帯南帯)に区分される。全体として北部から南部にかけて、地層の年代は新しくなっている。鹿児島県内では、北薩の紫尾山あたりを支点として、地層の走行が北東-南西からほぼ南北に屈曲している。西側から北帯の佐伯亜層群、蒲江亜層群、南帯の日向亜層群、日南亜層群と配列し、東側ほど新しい地層となっている。種子島・屋久島に分布する熊毛層群は南帯の地層である。

基盤岩類の分布は、人吉-小林-宮崎を結ぶ線を境に走行が変化するだけでなく、その南側では地層が 30 km ほど東側にずれたような分布を示す(向山ら, 1984)。この断裂を境とした南側の地形・地質は、破断した巨大地塊があたかも地すべりで移動・拡散したような分布形態を示している。地殻表層物質が地すべり岩塊状の配列を示すのは、14 Ma を中心に西南日本の全域にわたり地殻内に多量のマグマが供給されたため、地殻の下部~中部が延性的な性質を保持するようになったためかもしれない。

北帯の地層は砂岩、泥岩、砂泥互層であるが、凝灰岩、玄武岩溶岩、チャートなどを伴っている。全体に剪断の影響を強く受けており、地層の傾斜も急である。南帯の地層も砂岩、泥岩、砂泥互層が主体であるが、玄武岩やチャートも少なく、整然とした地層となっている。

北薩の屈曲を境に、仏像構造線も南に曲がり、阿久根-串木野を経て、薩摩半島の南西端、野間岬付近まで追跡可能である。構造線の西側にある久多島は、上部三畳系のチャートおよびチャートと互層をなす珪質ミクライト(尾上ら, 2007)からなり、野間岬の先端部には片麻岩、角閃岩、角閃片岩、蛇紋岩、輝岩などからなる野間岬変成岩(石川ら, 1974)がわずかに分布している。また甕島北東の双子島と黒神にも角閃岩が露出している(河内ら, 1964)が、これら変成岩類がどの地帯に対比されるのか、詳細は不明である。

基盤岩類に貫入した深成岩類としては、海溝側に大隅花崗岩、高隈花崗岩、屋久島花崗岩類、背



#### 4.2 火山岩類と堆積岩類

北薩・南薩地域には多くの火山岩や堆積岩が分布するが、これらは断裂構造の形成と密接に関連して形成されたものである。永尾 (2001) によると、背弧側の火山活動は 8Ma ころに始まり、7Ma ~6Ma には、肥薩・北薩・南薩地域でも火山活動が始まった (Fig. 9)。しかし宇都ら (1997b) では、北薩地域での火山活動の開始は 5Ma ころとされており、地域により活動開始の時期に多少のずれがあるのかもしれない。

宇都ら (1997b) は北薩地域の火山岩類を古期 (鮮新世前期, 5 Ma~4.3 Ma), 中期 (鮮新世中~後期, 3.4 Ma~1.9 Ma), 新期 (更新世前期, 1.7 Ma~1.0 Ma) に区分した。古期の噴出物の大部分は埋積されており詳細は不明であるが、宮崎層群に挟在する凝灰岩の最も古い年代は 6.3 Ma (鳥井ら, 2000) であり、北薩地域が給源であれば、このころには火山活動が始まっていたことになる。

桜島東側対岸の咲花平に産出する安山岩溶岩の年代は約 3 Ma (Kaneoka *et al.*, 1984) であり、中期に相当する。それゆえ中期の火山活動は、現在の火山フロント付近にまで拡大していたのであろう。中期でも特徴的な火山活動は、背弧側に多量に噴出した川内玄武岩類であり、その活動は 2.3 Ma~1.9Ma の長期にわたっている。同じころ、九州全域に“洪水安山岩” (永尾, 2001) が噴出している。“洪水安山岩”は溶岩台地状の地形をなし、一般的に板状節理が発達しているのが特徴である。溶岩台地状の形態を示すのは、溶岩流が比較的平坦な地溝帯内部に流れ広がったためかもしれない。宮崎層群中の凝灰岩の多くは 4 Ma~2Ma の年代を示しており、北薩地域での爆発的な火山活動の消長を示唆している (鳥井ら, 2000)。火山岩の噴出量を考慮すると、4 Ma~2Ma ころは火山活動が非常に活発な時期であったといえる。

新期の火山岩は東半側に分布している。また現在の活火山がほぼ東端に配列するため、火山活動の中心が西から東に移動したようにも見える。そのような現象は、金銀鉱床の形成年代からも推定された (浦島・池田, 1987)。しかし実際は火山フロント付近にも 3Ma 以降の火山岩が分布することから、火山活動域が現在の火山フロント沿いに狭まってきているとみなすべきであろう。

北薩三角地溝の内部には湖成層である永野層 (および相当層) が分布している。永野層中には 2.5 Ma の火砕流堆積物が 2 層知られている (内村ら, 2007) が、地下にはさらに多くの火砕流堆積物が

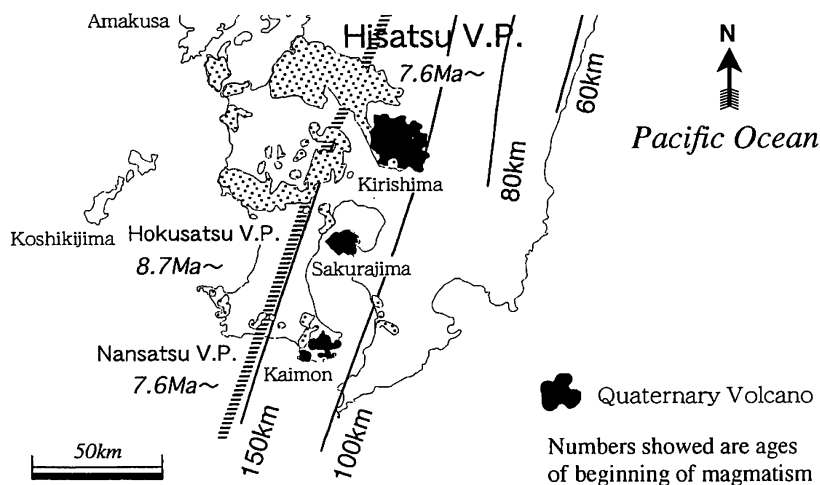


Fig. 9 Distribution of Late Quaternary volcanic rocks in southern Kyushu (modified from Nagao, 2001). Solid lines indicate the depth of subducting slab. V.P. : volcanic province.

埋積されている可能性が大きい。地溝内部では火山活動が活発であったため、1.7 Ma (Ueno *et al.*, 1999) には湖沼群はほぼ陸化した。

鹿児島地溝の形成開始年代ははっきりしていない。早坂・大木 (1971) によると、地溝内の基盤岩は照国火砕流堆積物に覆われた状態で階段状に沈降しており、それらは花倉層に不整合に覆われている (Fig. 6B 参照)。照国火砕流堆積物の年代は 3 Ma (柴田ら, 1978) であるが、花倉層は 0.8 Ma 以降の堆積物と推定されているため、地溝の形成は 1~0.7 Ma (大木ら, 1990), あるいは 0.8 Ma (宇都ら, 1997a) と考えられている。しかし花倉層の年代は、同層に覆われる三船流紋岩の年代 (0.8 Ma : Kaneoka and Suzuki, 1970) から推定されたものであり、地溝の深部ではさらに古い年代を示すと思われる。上記したように地溝の東側には約 3 Ma (Kaneoka *et al.*, 1984) の溶岩が存在することから、そのころから断裂が進行した可能性が大である。しかし湾奥の国分地域にまで海水が入り込み、加治木層や国分層群 (大塚・西井上, 1980) を堆積させたのは 1 Ma 以降と推定されている。2 Ma を中心とした火山活動の活発化とあまって、2 Ma~1 Ma ころに地溝の沈降も顕著になったと考えるべきかもしれない。

国分層群や花倉層以降の地層は、海水準の変化に伴い現在の海岸付近の低地に僅かに分布しているだけである。鹿児島湾奥の吉田貝層、鹿児島市の小山田層および背弧側の阿久根市の多田層は 0.58 Ma~0.34 Ma に堆積した可能性が高い (大木ら, 2000)。また 12 万年前には、鹿児島市付近に城山層、薩摩半島南西部に白川層、大隈半島の東側に串良層および夏井層が堆積した (大木, 1999)。なお海水の浸入は加久藤盆地にまでは達していない。加久藤盆地はかつて大きなカルデラ湖であったが、29 ka の始良カルデラの大噴火による火砕流堆積物に埋め立てられ、その後徐々に干上がったものである (荒牧, 1968)。

第四紀後半 (0.8 Ma 以降) の火山岩類の活動中心は、鹿児島の北部では 1) 始良カルデラ周辺地域、2) 霧島火山およびその周辺域、3) 蘭傘田火山周辺域の 3 地域 (宇都ら, 1997a)、南部では指宿火山地域に限定される。この時期に噴出した火砕流堆積物は広域に分布し、広大な火砕流台地を形成しているが、研究例も多い (例: 町田・新井, 2003) ため詳細については割愛した。ただし古い時代の噴出物では、分布や所属が不明のものが多く、たとえば~2 Ma と思われる火砕流堆積物が、北薩三角地溝・鹿児島地溝の外側に確認されている。北薩三角地溝の外側では、出水火砕流堆積物、阿久根火砕流堆積物、川内溶結凝灰岩、時代未詳の火砕流堆積物 (宇都ら, 1997b) などである。南九州における火山活動の全貌を知るうえで、これら火砕流堆積物の噴火年代と給源を特定することが必要である。

## 5. 地質構造と温泉

温泉は、古くから自噴していたものを利用してきたが、最近では深度掘削の技術が進歩し、比較的安価で 1,000 m 以深のボーリングが掘れるため、地下水さえあれば地温勾配に見合った温度の温泉を取り出すことができるようになった。露木 (1992) は古くから利用されてきたような温泉を「よい温泉」とよび、後者とは区別して地質構造との関係を議論した。本論は基本的には露木 (1992) にのっとり、鹿児島県の「よい温泉」と地質の関係を概説する。

### 5.1 温泉の大局的な分布

Fig. 10 は南九州における「よい温泉」の分布と地質構造概念を示した図である (露木, 1992)。「よい温泉」の大半は、鹿児島地溝、北薩三角地溝の内部に存在しており、温泉が火山活動の熱と密接な成因関係があることを示している。露木 (1969) の鹿児島地溝の概念も、元をたただせば、温泉の分布・泉質さらには成因が地溝の内部と外部で異なることに注目した結果の産物である。

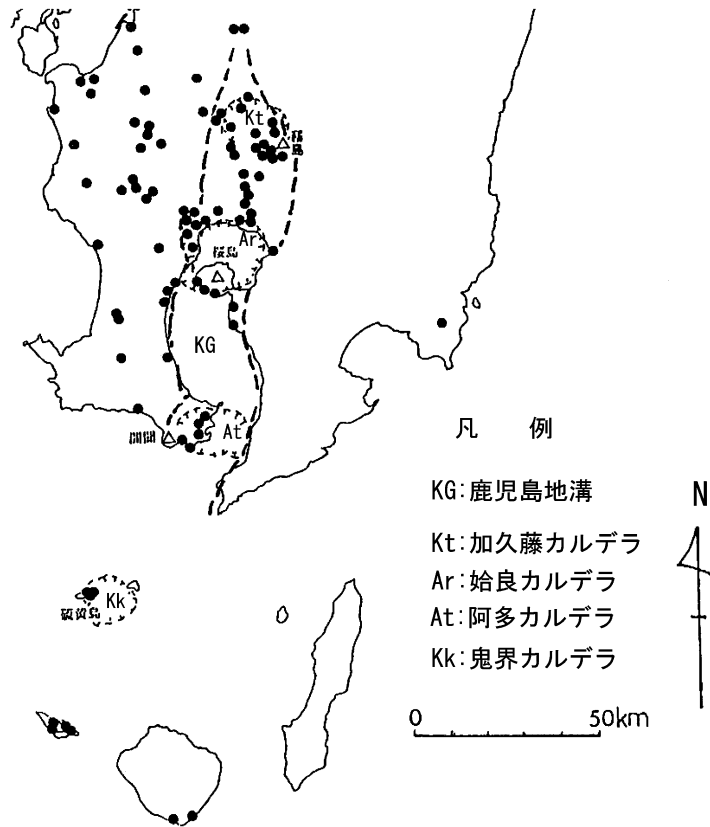


Fig. 10 Distribution of natural hot springs in southern Kyushu (modified from Tsuyuki, 1992)

露木 (1992) は南九州の温泉を成因にもとづいて、次の 6 群に分類した。1) 新期火山型温泉 (活火山の山頂・山腹の温泉・噴気), 2) 旧期火山型温泉 (数 10 万年以内の火山地域), 3) 古期火山型温泉 (数 100 万年以内の火山地域), 4) 古期堆積岩型温泉 (基盤岩地域), 5) 深成岩型温泉 (花崗岩地域), 6) 深部地下水型温泉 (深度掘削による温泉) である。このうち、1)~3) は火山性の温泉であり、大半は鹿児島地溝および北薩三角地溝の内部に存在している。4)~6) は非火山性の温泉と分類されているが、それらの熱源は近接したマグマあるいは熱を保持した深成岩類と推定され、広義では火山性の温泉に含まれる。なお今回の記載では、6) は省略した。

## 5.2 代表的な温泉と地質構造

### (1) 新期火山型温泉

活火山の火口付近の噴気型温泉が代表例であり、地表付近には地熱変質帯が広がっている。噴気孔付近では 80℃ 以上の高温泉が存在する。霧島火山地域、指宿火山地域、薩摩硫黄島などが代表例である。

噴気型温泉が地表に湧出せず、地下を流動し山麓に湧出することがある。湧出地点に噴気地帯も変質帯もみられない。Fig. 11 の桜島火山山麓の古里温泉が好例であり、山頂から流下する過程で、岩石との反応、温泉成分の沈着、地下水との希釈等により、泉質は徐々に変化する。



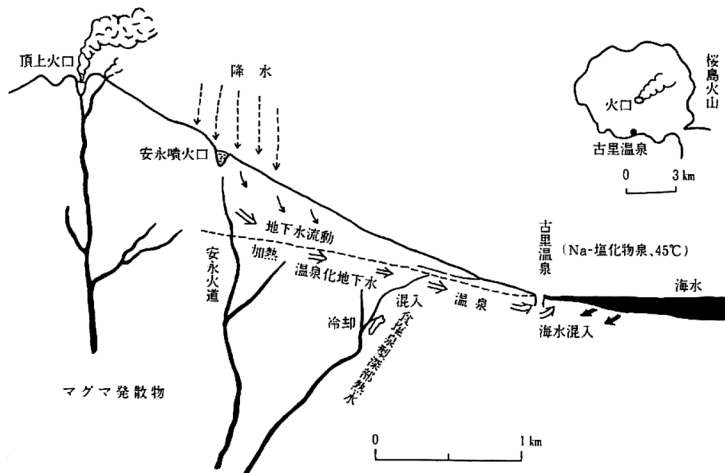


Fig. 11 Genetic model of hot springs at the foot of Sakurajima volcano (after Tsuyuki, 1992)

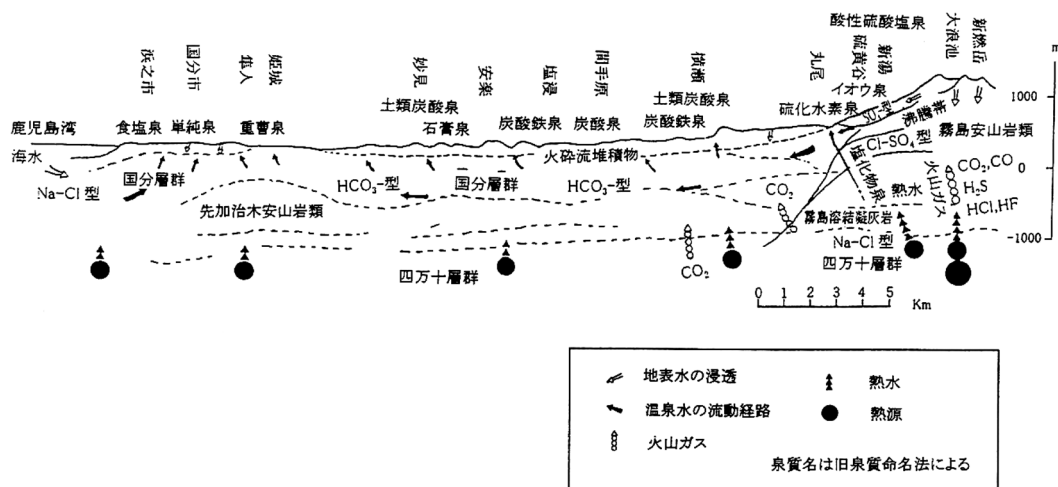


Fig. 12 Flow model chart of hot springs in the southwestern area of Kirishima volcano (after Tsuyuki, 1992 and Fujita *et al.*, 2000)

(2) 旧期火山型温泉

数10万年以降の火山地域に湧出する温泉であり、鹿児島地溝内部に湧出する温泉がこの定義に該当する。基本的には(1)と同じ成因の温泉である。Fig. 12は霧島火山から南西山麓にかけて分布する温泉の成因関係を示している。標高500m~600mには高温の噴気型温泉があるが、山麓の新川渓谷等では温度も低下(60℃以下)し、炭酸水素塩泉に変化する。下流の沖積平野でも古くは温泉が自噴していたが、現在は国分層群やさらに下位の安山岩中から採取している。霧島火山北西部の加久藤盆地にも多くの温泉があり、盆地を埋積している加久藤層群から取り出している。成因的には、南西山麓の温泉群と同じタイプに分類できる。

離島の活火山に湧出する温泉は、1)あるいは2)のタイプである。口之島や諏訪之瀬島のように

山腹で湧出する温泉もあるが、海岸で湧出する温泉が多く、海面には変色域が広がっている。鹿児島県での南限はトカラ列島南端の横当島の海岸に湧出する温泉であり、それ以南では沖縄県の硫黄島島の温泉があるだけである(黒川, 1997)。

### (3) 古期火山型温泉

北薩三角地溝内部の温泉が該当する。主要な火山活動が 1 Ma には終了しているため、温泉の温度も 60°C 以下のものが多い。泉質は炭酸水素塩泉が多く、アルカリ性単純泉もある。地溝内部は広い範囲にわたり地下深部に温泉が存在することから、地下水そのものが温泉となっているものと推定される。分布地域としては、大口盆地から湯之尾、栗野地域、また宮之城、市比野、入来、東郷、川内にわたる地域である。

大半の火山は地形の原形をとどめていないが、蘭牟田火山は 0.35 Ma~0.3 Ma (松本, 藤井, 1989; 阪口, 小林, 1989) と若く、地熱の兆候も多い。また顕著な負の重力異常を示す盆状構造の中心に位置しているため、地下には数 Ma のカルデラが埋積されている可能性がある。

### (4) 古期堆積岩型温泉

四万十類層群などの基盤岩の割れ目から湧出する温泉であり、北薩の湯川内、白木川内、阿久根、高城、紫尾等の温泉、やや南下して湯之元温泉、南薩の伊作温泉、さらに屋久島の諸温泉などがある。同じ温泉でも、湧出する亀裂が僅かに違うだけで、温度が大きく異なることもある。

また鹿児島市や垂水市の温泉では、地下 300 m~1,000 m 掘削して、基盤岩中に貯留している温泉を採取している。Fig. 13 は温泉ボーリングの資料をもとに描いた基盤岩深度分布図(早坂, 大木, 1971)と、その断面図である(露木, 1992)。基盤岩は断層により、地溝中心部にむかって階段状に落ち込んでいる(Fig. 6B 参照)。泉質は内陸側では炭酸水素塩泉~単純温泉であるが、海岸に近いあたりでは塩化物泉が多くなっている。

垂水市の地下での基盤岩深度分布も、基本的には鹿児島市と同じような形態であり、最深部は -650 m ほどである。ただこちら側では自噴する温泉も多く、泉質も単純泉~硫黄泉と異なっている。なお古期火山型温泉(3)でも、温泉貯留帯は基盤岩付近のこともあり、成因的には両者は類似した温泉とみなすこともできる。

### (5) 深成岩型温泉

深成岩あるいはその周辺から流出している温泉であり、花崗岩中から流出する温泉としては、高隈山花崗岩中の猿ヶ城温泉と大隅花崗岩中の内之浦温泉だけである。屋久島南部の温泉(尾之間, 平内)は四万十層中から湧出しているが、すぐ背後には屋久島花崗岩が存在しており、この型に分類すべきかもしれない。もし熱源をも考慮した分類となると、古期堆積岩型温泉(4)の一部もこのタイプに分類される。猿ヶ城温泉は県内では唯一の放射能泉であり、他は単純硫黄泉である。

### (6) その他の温泉

トカラ列島南部の小宝島にも温泉がある。島の中央に風化の著しい安山岩類があるが、周囲は隆起珊瑚礁に囲まれた小島である。火山岩の年代は古期火山期(3)に相当すると思われるが、泥地獄をとまう 70°C の高温の温泉が湧出している(露木ら, 1972)。古い火山岩が熱源にしては温度が高いため、沖縄トラフと関連した別の断層系に由来するものかもしれない。

温泉とは言えないが、沖縄トラフの伊平屋海凹中の海底火山(水深 1,000 m)では、現在でも 238°C (~310°C) の高温熱水が噴出しており、重金属を含む沈殿物(硫化物)からなるチムニーが形成されている(千葉ら, 1996)。鹿児島湾奥の水深 200 m の若尊カルデラ底でも、200°C ほどの噴気があり、噴気ガスが海水面で泡立つため「たぎり」とよばれている(鹿児島県, 1978)。

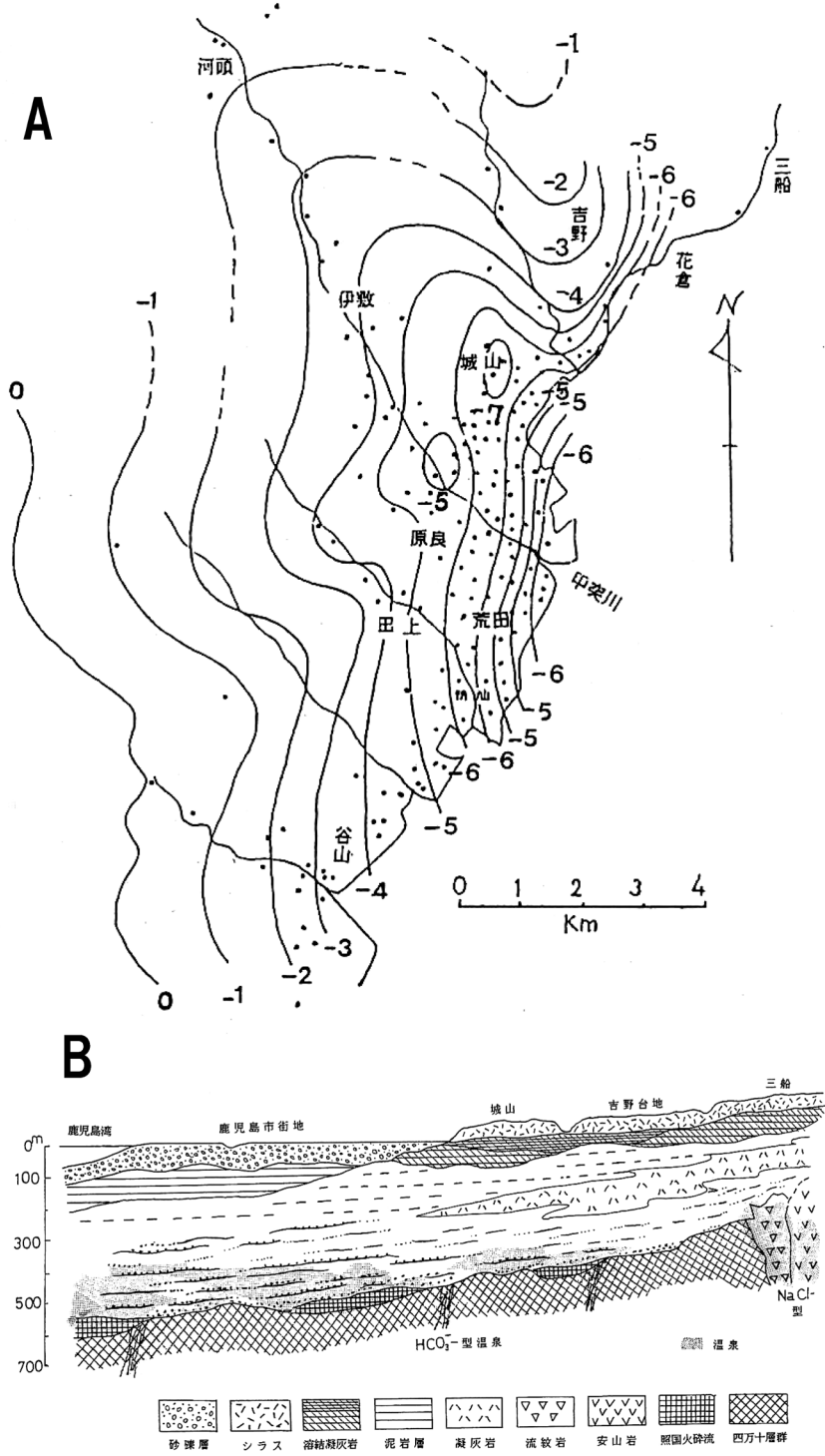


Fig. 13 Configuration map of basement rocks underneath Kagoshima city (A : modified from Hayasaka and Oki, 1971) and the E-W cross section of this area showing the horizon of hot water in the deposits (B : Tsuyuki, 1992)

## 6. おわりに

南九州の地質の形成と温泉の関係を概観した。南九州の基盤岩類（主に四万十累層群）は 10 Ma 以降の沖繩トラフの形成・拡大と関連した数次の変動を経て、現在の骨格が形成されてきた。最初の変動は 6 Ma 以降に始まった断裂運動と火山活動である。火山活動は 4 Ma~2 Ma が最も激しく、かつ広域にわたっていた。この期間を通じて、北薩三角地溝や鹿児島地溝の原形が形成されたと推定された。1 Ma 以降は鹿児島地溝の内部でカルデラ噴火など、活発な火山活動を行っている。

温泉の大半は鹿児島地溝と北薩三角地溝の内部に分布しており、温泉が火山活動の熱と密接な成因関係にあることを示している。また新第三紀 (14 Ma) の花崗岩類も温泉の熱源となっているらしく、基盤岩の亀裂から湧出する温泉も近隣の深成岩体あるいはマグマが熱源となっている。このように南九州の温泉を概観すると、火山性-非火山性を問わず、すべてが火山活動と関連した温泉とみなすことができる。

## 謝 辞

鹿児島大学名誉教授であった故露木利貞先生には、温泉のみならず九州の地質全般について、また熊本学園大学の鳥井真之博士、長崎大学の長岡信治博士、鹿児島大学の内村公大博士には、テフラ・地形・地質に関する最新の情報についてご教授いただいた。鹿児島県保険福祉部生活衛生課には、温泉ボーリングデータの使用を許可していただいた。あわせて感謝いたします。

## 引用文献

- 荒牧重雄 (1968) : 加久藤盆地の地質一えびの・吉松地域の地震に関連して一。東京大学地震研究所彙報, **46**, 1325-1343.
- Arita, T. (1954) : The geological structure of Kagoshima Prefecture, Kyushu district, Japan. Sci. Rep. Kanazawa Univ., no. 2, 12-131.
- 千葉 仁, 石橋純一郎, 上野宏共, 大森 保, 内山明紀, 武田哲一, 高峰朝一郎, 李 受映, 糸満彩子 (1996) : 伊平屋海凹北部海丘の海底熱水活動。JAMSTEC 深海研究, no. 12, 211-219.
- 藤田俊一, 坂元隼雄, 桐山哲也 (2000) : 霧島火山地域及びその南西部地域の温泉の生成機構。温泉科学, **50**, 1-11.
- 橋本 勇 (1962) : 鹿児島県北薩地方の時代未詳層群の層序と構造。九州大学教養地学研究, no. 8, 47-62.
- 早坂祥三 (1982) : 地溝性陥没現象としての鹿児島湾。文部省科学研究費総合研究 (A) 「九州の基盤と陥没構造」 (代表者 松本征夫) 報告書, no. 1, 76-78.
- 早坂祥三, 大木公彦 (1971) : 鹿児島市地域のボーリング資料にもとづく地質学的考察。鹿児島大学理学部紀要 (地学・生物学), no. 4, 15-29.
- 石川秀雄, 内 達夫, 金丸 敏 (1974) : 鹿児島県野間岬における変成岩類。地質学雑誌, **80**, 429-430.
- 鹿児島県 (1978) : 鹿児島湾の水銀に係る環境調査報告書。38 p.
- 鎌田浩毅, 児玉一人 (1993) : 火山構造的陥没地としての豊肥火山地域とその形成テクトニクスー西南日本弧・琉球弧会合部におけるフィリピン海プレートの斜め沈み込み開始が引き起こした 3 現象一。地質学論集, no. 41, 129-148.
- Kamata, H. and Kodama, K. (1999) : Volcanic history and tectonics of the Southwest Japan Arc. The Island Arc, **8**, 393-403.
- Kaneoka, I. and Suzuki, M. (1970) : K-Ar and fission-track ages of some obsidians from Japan.

- J. Geol. Soc. Japan, **76**, 309-313.
- Kaneoka, I., Aramaki, S., Kobayashi, T. and Oki, K. (1984) : Pliocene and Pleistocene volcanism in southern Kyushu : K-Ar ages of Fumoto and Isaku pyroclastic flows and related rocks. Bull. Volcanol. Soc. Japan, **29**, 59-62.
- 河内洋佑, 石原舜三, 神戸信和 (1964) : 鹿児島県双子島および黒神の角閃岩. 地質調査所月報, **15**, 341-343.
- 河野義礼, 植田良雄 (1966) : 本邦産火成岩の K-Ar dating (V) 西日本の花崗岩類. 岩鉱, **56**, 191-211.
- Kimura, M. (1985) : Back-arc rifting in the Okinawa Trough. Marine and Petroleum Geology, **2**, 222-240.
- Kodama, K., Tashiro, H. and Takeuchi, T. (1995) : Quaternary counterclockwise rotation of south Kyushu, southwest Japan. Geology, **23**, 823-826.
- 小西健二 (1965) : 琉球列島 (南西諸島) の構造区分. 地質学雑誌, **71**, 437-457.
- Koto, B. (1916) : The great eruption of Sakura-jima in 1914. J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo, **38**, 1-237.
- 久保田喜裕 (1986) : 南九州北薩地域における金銀鉱床の生成とその造構史的背景. 鉱山地質, **36**, 459-474.
- 久保田喜裕 (2006) : 九州のグラーベンと内在コールドロン群との関係一特に先行隆起との関連について一. 地球科学, **60**, 229-239.
- 黒川達爾雄 (1997) : いで湯の国・鹿児島. 鹿児島文庫 41, 春苑堂出版, 鹿児島, 228 p.
- 町田 洋, 新井房夫 (2003) : 新版 火山灰アトラスー日本列島とその周辺一. 336 p, 東京大学出版会, 東京.
- 松本哲一, 藤井紀之 (1989) : 鹿児島県蘭牟田火山溶岩の K-Ar 年代一入来カオリン鉱床の生成時期と関連して一. 岩鉱, **84**, 398-402.
- 三木雅子 (1991) : 古地磁気からみた沖縄トラフの形成モデル. 月間地球 号外, no. 3, 212-216.
- 向山 広, 中村真人, 井上雅弘, 木村 強 (1984) : 火砕流を伴う火山活動と断裂. 火山, **29**, 45-56.
- 永尾隆志 (2001) : 南部九州の鮮新世大規模火山活動とテクトニクス. 平成 11 年度～平成 12 年度科学研究費補助金 [基盤研究 (C) (2)] 研究成果報告書 (研究代表者 永尾隆志), 91 p.
- 小笠原正継 (1997) : 種子島南部島間の石英斑岩の K-Ar 年代と岩石学的特徴および種子島北部のランプロファイアーの K-Ar 年代 : 西南日本外帯中新世火成活動における位置付け. 岩鉱, **92**, 454-464.
- 大木公彦 (1999) : 鹿児島県に分布する後期更新世海成層の堆積環境とネオテクトニクス. 南太平洋海域調査研究報告, no. 32, 81-87.
- 大木公彦, 船津俊宏・早坂祥三 (1990) : 鹿児島市南部の地質・とくに伊作火砕流と照国火砕流との関係について. 浦島幸世教授退官記念論集, 125-133.
- 大木公彦, 下山正一, 佐藤 亮, 成尾英仁 (2000) : 鹿児島県, 阿久根市から発見された第四紀海成層「多田層」の層位学的意義. 鹿児島大学理学部紀要, no. 33, 61-68.
- 尾上哲治, 吉田麻美, 坂本秀平 (2007) : 鹿児島県久多島, 三宝山付加コンプレックスの深海・遠洋性石灰岩. 地質学雑誌, **113**, I-II.
- 大塚裕之, 西井上剛資 (1980) : 鹿児島湾北部沿岸地域の第四系. 鹿児島大学理学部紀要 (地学・生物学), no. 13, 35-76.
- 阪口圭一, 小林哲夫 (1989) : 蘭牟田火山の K-Ar 年代. 日本火山学会講演予稿集 (1989 年度春季大



会), 7.

柴田 賢 (1978) : 西南日本における第三紀花崗岩貫入の同時性. 地質調査所月報, **29**, 551-554.

Shibata, K. and Nozawa, T. (1966) : K-Ar ages of granites from Amami-oshima, Ryukyu islands, Japan. Bull. Geol. Surv. Japan, **17**, 430-435.

Shibata, K. and Nozawa, T. (1968) : K-Ar ages of acid rocks of Noma-misaki and Hioki mountains, Kyushu, Japan. Bull. Geol. Surv. Japan, **19**, 233-236.

柴田 賢, 小野晃司, 早坂祥三, 大木公彦, 山本温彦 (1978) : 鹿児島市直下, 照国火砕流の K-Ar 年代. 地質学雑誌, **84**, 551-553.

資源エネルギー庁 (1988) : 昭和 62 年度広域地質構造調査報告書一北薩・串木野地域一. 69 p.

種子田定勝, 大木和世 (1972) : 種子島の“長大なアルカリ岩脈”. 火山, **2**, 88-97.

寺岡易司 (2004) : 九州の四万十累層群. 地質ニュース, no. 599, 40-48.

鳥井雅之, 林田 明, 乙藤洋一郎 (1985) : 西南日本の回転と日本海の誕生. 科学, **55**, 47-52.

鳥井真之, 池田和則, 板谷徹丸 (1999) : 熊本県人吉盆地に分布する人吉層中の凝灰岩の K-Ar 年代. 地質学雑誌, **105**, 585-588.

鳥井真之, 尾田太良, 板谷徹丸 (2000) : 宮崎層群に挟在する凝灰岩層とその K-Ar 年代. 火山, **45**, 131-148.

露木利貞 (1969) : 九州地方における温泉の地質学的研究 (第 5 報) 鹿児島地溝内の温泉一特に温泉貯留体について. 鹿児島大学理学部紀要 (地学・生物学), no. 2, 85-101.

露木利貞 (1992) : 九州における温泉と地質一鹿児島温泉を中心として一. 九州における温泉と地質 (露木利貞教授退官記念会編), 徳田屋書店, 鹿児島, 1-105.

露木利貞, 鎌田政明, 黒川達爾雄 (1972) : 鹿児島県の温泉一離島の諸温泉一. 鹿児島県編, 33 p.

内村公大, 大木公彦, 古澤 明 (2007) : 鹿児島県八重山地域の地質と鮮新統郡山層の層位学的研究. 地質学雑誌, **113**, 95-112.

Ueno, M., Takeda, T., Otsuka, H. and Shimada, N. (1999) : Paleomagnetic evidence for the timing of the gold mineralization in Kagoshima, Japan. Mineral Deposits : Process to Processing (Stankey C. J. *et al.*, eds), 1241-1244

宇都幸三, 阪口圭一, 内海 茂 (1997a) : 鹿児島県北薩地域の新第三紀火山活動史と火山構造性地溝の形成. 京都大学防災研究所研究集会 (9S-4) 古地磁気学的手法を用いた火山活動史の復元 (研究代表者 味喜大介), 89-95.

宇都幸三, 阪口圭一, 寺岡易司, 奥村公男, 駒澤正夫 (1997b) : 20 万分の 1 地質図「鹿児島」. 地質調査所.

浦島幸世, 池田富男 (1987) : 布計, 大口, 黒仁田, 花籠各鉱床の氷長石の K-Ar 年代. 鉱山地質, **37**, 205-213.

Yagi, K., Ishikawa, H. and Kojima, M. (1975) : Petrology of a lamprophyre sheet in Tane-gashima island, Kagoshima prefecture, Japan. J. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. And Economic Geologists, **70**, 213-224.

Yamamoto, M., Kawano, Y., Imai, A. and Nishimura, K. (2003) : Miocene granites and the Hishikari gold deposits in Kyushu. Hutton Symposium V, Field Guidebook, Geol. Surv. Japan, Interim Report, no. 28, 61-80.

米田茂夫, 岩松 暉 (1987) : 鹿児島県北薩地方の四万十累層群の層序と地質構造. 地質学雑誌, **93**, 881-895.