



解 説

大陸縫合帯 (Suture Zone) の温泉 (3)

—西南日本舞鶴帯の温泉—

西村 進^{1)*}, 赤松 信¹⁾

(平成 24 年 12 月 26 日受付, 平成 25 年 1 月 24 日受理)

Hot Springs along Suture Zone (3)

—Hot Springs along Maizuru Belt, Southwest Japan—

Susumu NISHIMURA^{1)*} and Makoto AKAMATSU¹⁾

Abstract

This paper discusses on the occurrence of hot springs along the Maizuru belt of a suture zone in Japan. In the Maizuru belt, it is found that the sea-flower crust such as serpentine and ophiolite, named as Yakuno complex, of Late Paleozoic and Early Mesozoic. After the geological and geophysical surveys along the Mizuru belt, it is succeeded to get some drilling wells of hot and mineral springs in this belt. It is, however, quite difficult to get drilling wells of any hot and mineral springs in Tamba block of the south site of the Maizuru belt, except along Yamasaki tectonic fault zone and in the area of granitic intrusions.

These hot and mineral springs have some characteristics, as follows : (1) These non-volcanic hot and/or mineral springs contain many kinds of ions in rich amounts. (2) The geothermal gradients are around 2.5~3.0°C/100 m (general geothermal gradient), and we could not found spring water higher than 42°C. (3) They have been pumping up usually small quantities but continued as same quantities in each wells.

Key words : Non-volcanic hot springs, Suture zone, Maizuru belt, Yakuno complex

要 旨

縫合帯 (Suture zone) に沿って存在する温泉についての最後の解説は舞鶴帯の縫合帯である。舞鶴帯には海洋底プレートの蛇紋岩, オフィオライト (これらを総称として, 夜久野コンプレックス) が見られ, 古生代末期から中生代初期の縫合帯である。綿密な探査を行い, いくつかの低温泉や冷鉱泉を掘削することができた。しかしその南に広がる丹波帯では山崎断層系

¹⁾ 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。 ¹⁾ NPO Think-tank Kyoto Institute of Natural History, Kinki-chiho Hatsumei Center, Yoshida-Kawaramachi 14, Sakyō-ku, Kyoto 606-8305, Japan. *Corresponding author : E-mail tkinh-1@isis.ocn.ne.jp, TEL 075-761-2526, FAX 075-761-2544.

近辺や花崗岩貫入地域を除き、低温泉や冷鉱泉の掘削が成功したとは聞かない。

舞鶴帯の温泉の特徴は、①非火山性のもので、含有成分が多様で多量含む。②地温勾配が2.5~3.0°C/100m（西南日本の一般的な地温勾配）である。この地帯では高温泉（42°C以上）は見つかっていない。③湯量は比較的少ないものが多いが、沈殿物で閉塞することが少ない。

キーワード：非火山性温泉、縫合帯、舞鶴帯、夜久野コンプレックス

1. はじめに

我々が大陸の縫合帯に温泉の存在を知り、若い縫合帯であるアルジェリアのアトラス山脈沿いに高温の温泉が岩盤の亀裂から自然に湧出した、また僅か掘り下げて湧出させ利用されているのを調査し、第1報（西村、2012）でまとめ、第2報として、アルプス造山運動時のアラビアプレートとユーラシアプレートの縫合帯のイランの温泉について報告した（西村ら、2012）。

さらに古い縫合帯に見られる温泉の例は我が国にもある。早くから研究されてきた舞鶴帯に夜久野オフィオライトが見つけ出されて、舞鶴帯が大陸の縫合帯であることが確かめられた（石渡、1978）。この縫合帯は古生代末期から中生代初期のものである。最近まで舞鶴帯や丹波帯では1,000m以上の深度に掘削しても採湯することが出来ず、温泉を得ることは出来ないとされていたが、綿密な温泉探査をし、この25年ほどで約1,000m深度の掘削により温泉が舞鶴帯・超丹波帯で得られてきた。しかし、その南側に近接する丹波帯では、山崎断層系や花崗岩貫入域を除いて、1,000m以上の掘削でも、温泉掘削が成功していない。なお、舞鶴帯のさらに日本海側では、城崎温泉、湯村温泉で代表される第四紀のアルカリ玄武岩の火山活動に伴う火山性の温泉が見られる（西村・赤松、2011）。この地域の地質構造単元は、北側の日本海沿いの第三紀・第四紀の火山活動域、その南に舞鶴帯の縫合帯、超丹波帯、丹波帯に分けられる。特に地質構造と温泉を議論するので、作用町上月より西にも開発した温泉があるが、縫合帯の構造が整っている部分の温泉について紹介する。

2. 舞鶴帯の地質構造

京都府北部の舞鶴市から兵庫県作用町上月を経て岡山県西部にかけて、東北東—西南西にのびる400km、幅10~50kmの特殊な地質構造帯がある（Fig. 1）。上月より東では明瞭な帯状構造をなすが、それより西では花崗岩の貫入によるのか、山崎断層系の活動のためか、その分布が広がり構造が複雑になる。上月より東部を松下（1950）により舞鶴地帯と命名されたが、さらに岡山県西部までを含めて最近では舞鶴帯（Maizuru Belt または Maizuru Zone）と呼ばれている。

舞鶴帯は中・上部ペルム系舞鶴層群、三疊系夜久野岩類より成り、その上部の三疊系は舞鶴層群や夜久野岩類を不整合に覆う。夜久野岩類は古生代の堆積岩類でそれに密接に伴う花崗岩や玄武岩、変成岩を含めて一つのオフィオライトを構成する（石渡、1978）。この夜久野オフィオライトは若狭湾の大島半島から岡山市西方まで、幅5km 延長250kmの帯状に分布する日本最大のオフィオライトであり、夜久野以東では南北2列をなす。下位から溶け残りの橄欖岩、火成沈積岩、玄武岩質火山岩の順に重なる層状複合岩体が見られ、ペルム紀以前の島弧縁海の海洋底地殻、マンツルの断片から成る。舞鶴帯ペルム紀付加体（超丹波帯）に衝上するナップとして産する（Fig. 1）。この舞鶴帯やその近辺には、生野鉱山、明延鉱山で代表される多くの鉱床が存在し、縫合帯ができた時代には活発な熱水活動があったところである（Fig. 2）。

この舞鶴帯の活動は古く、現在では安定化し、前述のアルジェリアやイランの2縫合帯と異なり、現在は地震の発生が極めて少なく、地下活動は活発ではない。なお、現在の震源分布は兵庫県南部

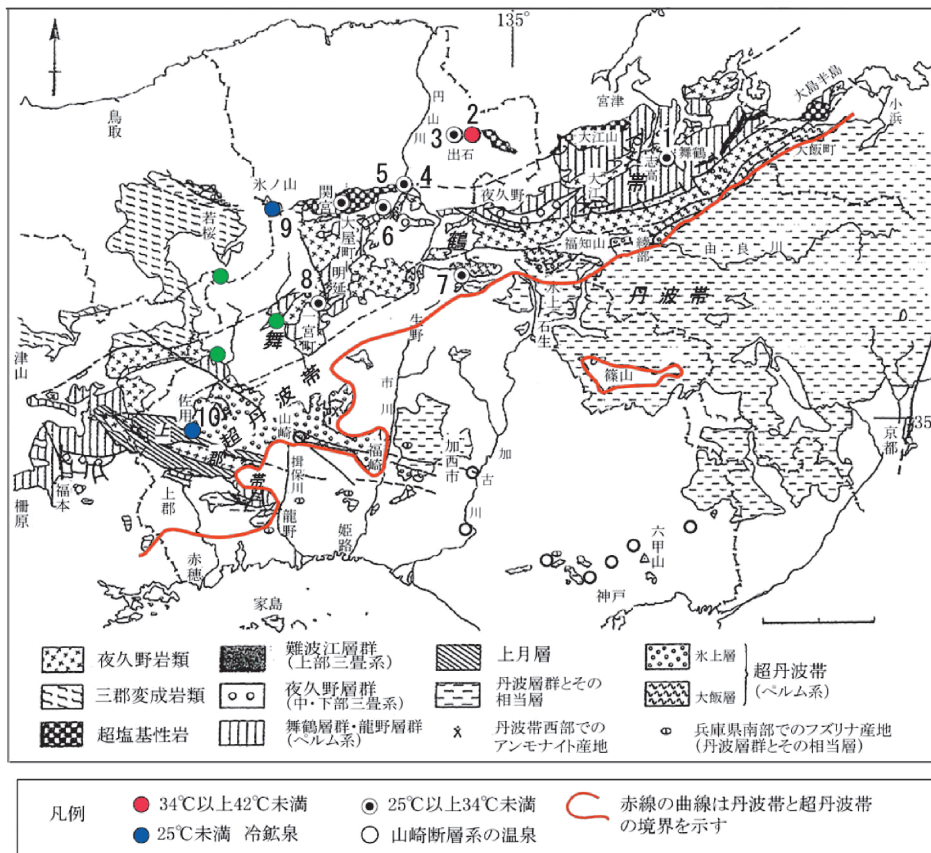


Fig. 1 Maizuru belt and distribution of hot springs (Geological map is modified from Shimizu, 1987). ○ : Hot springs are shown as numbers (1-10).

図 1 舞鶴帯と温泉の分布 (舞鶴帯の地質図 (清水, 1987) に加筆). ○ : 温泉の所在地とその番号を示す (1-10).

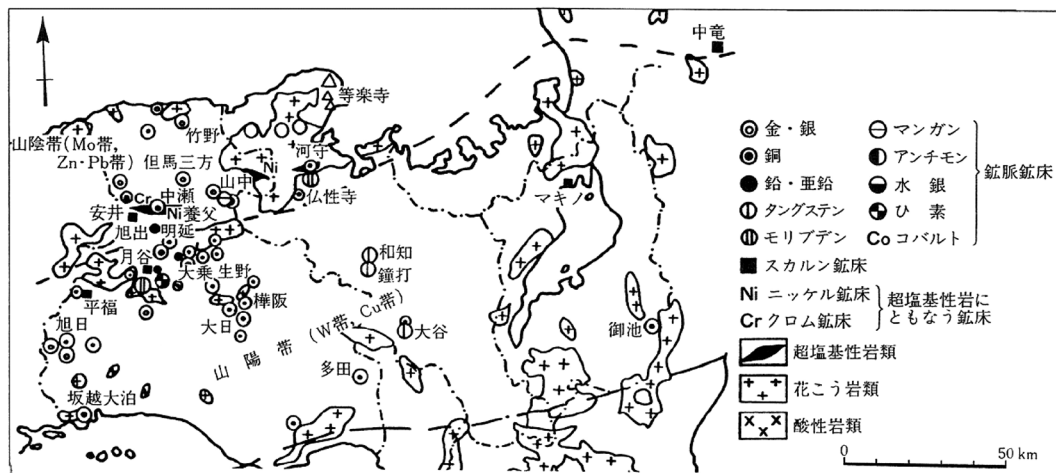


Fig. 2 The distribution of mineral deposits in north part of Kinki District (modified from Nakamura, 1987).

図 2 近畿地方北部の金属鉱床 ((中村, 1987) を参考に作成).

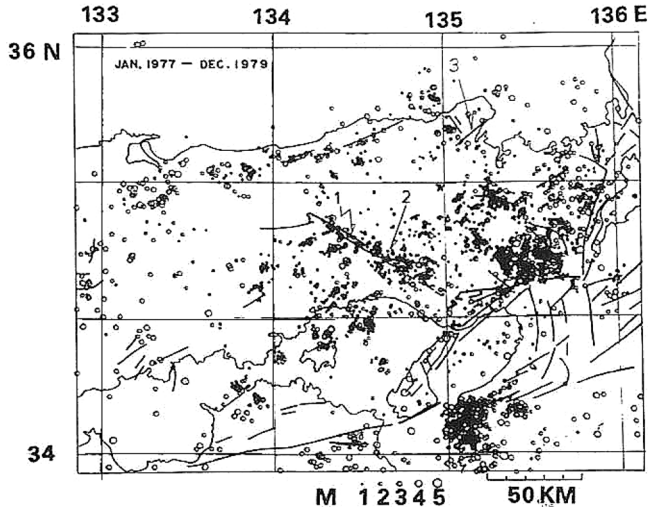


Fig. 3 Distributions of micro-earthquakes (1977-1979) and active faults in the northern Kinki and eastern Chugoku Districts, Southwest Japan. Lines extending from NW to SE denoted by 1 is the Yamasaki Fault System, and 1, Yamasaki fault; 2, Yasutomi fault; and 3, Yamada fault (Kishimoto, 1981).

図 3 西南日本の北近畿地方ならびに東中国地方での微小地震 (1977-1979) の震源分布と断層の分布. 北西—南東の線は山崎断層系を示し, 特に, 1: 山崎断層, 2: 安富断層, 3: 山田断層示す (Kishimoto, 1981).

地震の余震が多ので, ここでは震災前の震央分布図を示す (Fig. 3: Kishimoto, 1981).

3. 舞鶴帯の温泉

山陰地方では, 舞鶴帯を含む部分から南部の丹波帯では掘削しても温泉が得られないと信じられていたが, 兵庫県の補助事業として, 西村・赤松 (2011) によって, 毎年 1 市町の温泉の探査, 掘削指導がされ, その結果舞鶴帯に 1,000~1,300m の掘削により, 11 か所の温泉が取得できた. しかし, さらに南側の丹波帯では山崎断層系沿いや花崗岩地帯を除いては現在でも大深度岩盤掘削により温泉を得ることが出来たとは聞かない (西村・赤松, 2011; Fig. 1).

舞鶴帯は, 丹後・但馬の火山帯の地温勾配 (6.0°C/100m 以上) と異なり, ほぼ 2.5~3.0°C/100m のこの地方の通常の地温勾配を示している. この温度構造を利用しての低温泉 (泉温 25°C 以上 34°C 未満) が得られている. 温泉法に適合したものは, 次の 11 泉源である (Fig. 1 の中に番号を付けた泉源). これらの温泉に関する分析値は掘削完了時になされた温泉分析表による. その後, 自治体や民間が舞鶴帯に掘削して 3 か所ばかり利用されている (Fig. 1 の緑色の 3 泉源) (神戸新聞総合出版センター, 2003).

Figure 1 の 11 泉源を番号順に紹介すると,

- ① 舞鶴市十倉温泉: 含銅—ナトリウム—炭酸水素塩・塩化物温泉; 動力汲み上げ; 泉温 26.5°C; 汲み上げ量 11.76 l/分; pH 8.1; 蒸発残留物 3,213 mg/kg.
- ②-1 豊岡市但東町 シルク温泉 1 号泉: ナトリウム—炭酸水素塩・塩化物温泉; 動力汲み上げ; 泉温 31.2°C; 汲み上げ量 65 l/分; pH 7.3 蒸発残留物 3,270 mg/kg.
- ②-2 シルク温泉 2 号泉 (シルク温泉 1 号泉の西 500m に位置する): 含弱放射能—ナトリウム

- 炭酸水素塩・硫酸塩・塩化物温泉；動力汲み上げ；泉温 39.4℃；汲み上げ量 263 l/分；pH 7.7；蒸発残留物 4,631.6 mg/kg.
- ③ 豊岡市出石町乙女の湯：ナトリウム—炭酸水素塩・硫酸塩温泉；動力汲み上げ；泉温 29℃；汲み上げ量 380 l/分；pH 8.0；蒸発残留物 991 mg/kg.
- ④ 養父市八鹿町とがやま温泉：含二酸化炭素—ナトリウム・マグネシウム—塩化物・炭酸水素塩温泉；動力汲み上げ；泉温 28.2℃；汲み上げ量 30 l/分；pH 6.6；蒸発残留物 5,543 mg/kg.
- ⑤ 養父市関宮町：ナトリウム—塩化物温泉；動力組み上げ；泉温 31.5℃；pH 7.0；蒸発残留物 12,550 mg/kg.
- ⑥ 養父市養父温泉：単純温泉；動力汲み上げ；泉温 27.5℃；汲み上げ量 24 l/分，pH 8.2；蒸発残留物 668 mg/kg.
- ⑦ 朝来市生野町黒川温泉：アルカリ性単純温泉；動力汲み上げ；泉温 29.1℃；汲み上げ量 49.4 l/分；pH 8.7；蒸発残留物 790 mg/kg.
- ⑧ 宍粟市一宮町まほろばの湯：ナトリウム・カルシウム—塩化物温泉；動力汲み上げ；泉温 32.2℃；汲み上げ量 143 l/分；pH 8.9；蒸発残留物 8,638.1 mg/kg.
- ⑨ 養父市若杉 若杉高原温泉：含弱放射能—カルシウム—硫酸塩冷鉱泉；自噴；泉温 9.8℃；自噴量 0.8 l/分；pH 6.2；蒸発残留物 1,912.3 mg/kg.
- ⑩ 佐用町三日月 三日月温泉：塩化物冷鉱泉；動力汲み上げ；汲み上げ量 1.58 l/分；pH 6.6；蒸発残留物 4,018 mg/kg.

pH が中性のものは、二酸化炭素を含むが、二酸化炭素が抜けてしまうと、炭酸水素塩泉（重曹泉）となり、pH は 8 程度になる。各温泉の温泉分析表による主な成分を Table 1 に示す。

これらの泉源の中では、⑨の若杉高原温泉は非常に浅い傾斜掘削で自噴している泉源で、鉱染作用を受けている部分から湧出している。他は 1,000~1,300 m 深度の掘削井である。⑦生野の黒川温泉は超丹波帯の白亜系の地層中の掘削であり、厳密には舞鶴帯には属さないが、丹波帯より古く超丹波帯とされている地質単元に胚胎する。舞鶴帯や超丹波帯には、生野鉱山、明延鉱山、大身谷鉱山で代表される熱水鉱床が多くみられ、その生成はこの地質構造と同時代と推定される (Fig. 2)。

これらの泉質で特に注目する点は、夜久野オフィオライトの場所の泉源は蒸発残留物が揚湯量の少ないものが 1,000 mg/kg 以下であるが、おおむね非常に多い。また、分析表にないが金属の含有

Table 1 Main chemical components of hot spring waters in the Maizuru belt (Numbers are shown in Fig. 1).
表 1 舞鶴帯の温泉の主要含有物 (温泉分析表, 表の番号は Fig. 1 の番号に対応する)。

No.	泉源名	水温 (℃)	陽イオン					陰イオン						溶存ガス	
			Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	SiO ₃ ²⁻	CO ₂	H ₂ S
1	舞鶴十倉温泉	26.5	1,347	12.6	10.6	1.9	1.9	10.3	987	11	1,883	40.2	—	—	—
2-1	但東町シルク温泉 1 号	31.2	1,650	24.2	25.1	10.2	1.67	6.11	78.3	1,110	1,870	6.33	32.2	70.3	0.03
2-2	但東町シルク温泉 2 号	39.4	1,246	13.0	12.5	7.7	0.6	6.9	484.6	275.4	2,140	1.5	16.4	60.3	—
3	出石町乙女の湯	29.0	410	2.19	6.42	1.34	1.57	0.7	120	194	634	2.40	5	10.6	—
4	八鹿町とがやま温泉	28.2	1,680	44.5	96.3	53.1	17	—	2,350	8.96	2,880	—	155	1,110	—
5	関宮温泉	31.5	5,500	41.8	204	279	14.4	—	8,490	13	663	0.48	108	116	—
6	養父温泉	27.5	277	5.44	5.48	1.17	0.17	7.63	11.3	7.86	634	6.05	22.8	8.45	—
7	生野町、黒川温泉	29.1	54.8	5.07	42.1	2.9	0.16	19.8	6.25	0.6	220	4.17	20.4	0.74	—
8	一宮町まほろばの湯	32.2	2,020	8.85	143.0	0.4	0.36	—	5,180	1.99	44.3	2.38	22.1	0.11	—
9	若杉高原温泉	9.8	43	0.26	551.0	31.8	2.26	0.31	38.6	1,530	106	—	53.6	105	—
10	佐用町三日月温泉	—	1,166	12.7	342	86	10.4	—	1,964	94.2	33.8	0.01	13.6	—	—

*温泉水にはこの pH 領域では H₂SiO₃ で存在するがここには SiO₃²⁻ の値として掲載した。

が多い。主要イオン組成を示すトリリニアダイアグラム (Fig. 4) を見ると, 11 泉源で泉源数は少ないが, 成分の変化幅は近畿地方の他の地質構造の温泉よりも広い。特に陽イオンではアルカリに富み, カルシウムは幅広く含有し, 陰イオンは炭酸水素塩を多く含む。塩化物イオンも比較的広い分布である。塩素とナトリウムの相関が一番良い (Fig. 5) が, アルジェリアやイランより相関は

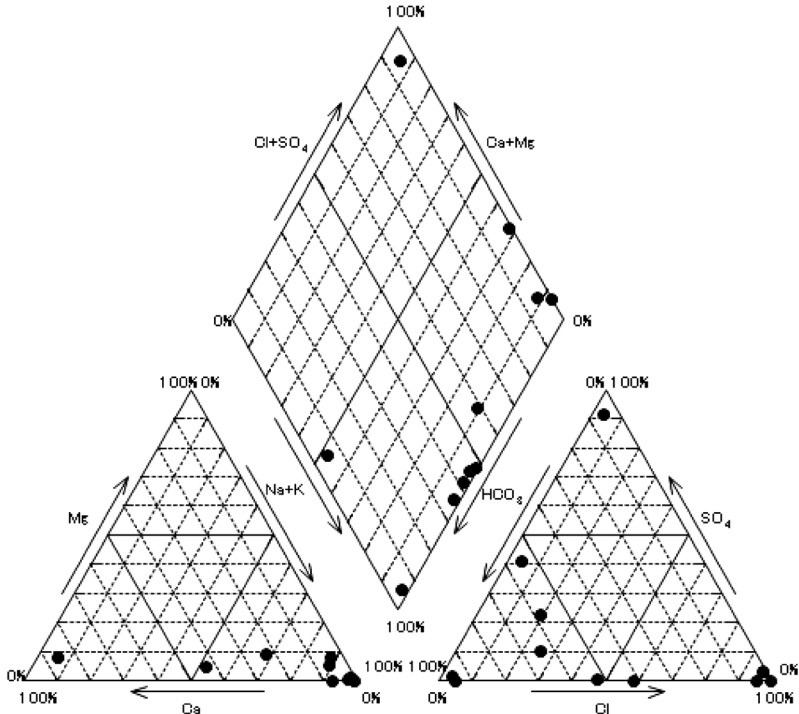


Fig. 4 Trilinear diagram of hot springs in Maizuru belt.

図 4 舞鶴帯の温泉水のトリリニアダイアグラム。

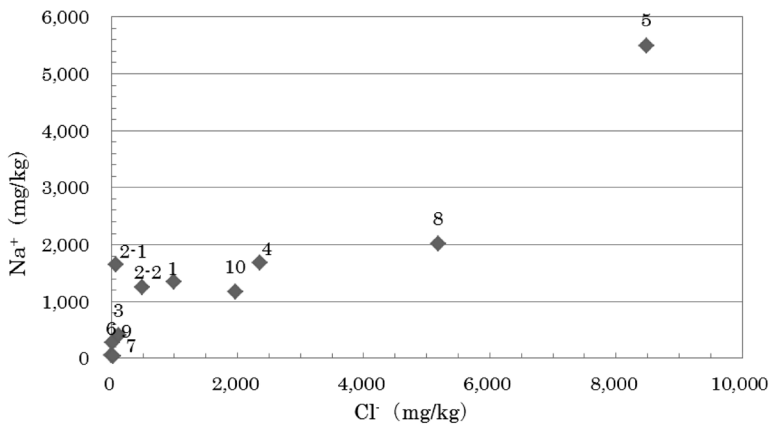


Fig. 5 Relation between Na ion and chloride ion contents of hot spring waters along Maizuru belt (Numbers are shown in Fig. 1).

図 5 舞鶴帯の温泉水の塩化物イオンとナトリウムイオンの相関 (図中の番号は Fig. 1 に対応する)。

悪い。塩化物イオンと硫酸イオンには異なった傾向がみられる (Fig. 6)。他の 2 地域と比べて、遊離二酸化炭素の含有は少ない。温泉の分類は Table 2 に示すように、塩化物炭酸水素塩泉か炭酸水素塩塩化物泉が卓越している。

すなわち、多種の成分を含み、隣接する超丹波帯の背斜軸にはほぼ直交する非常に短い引張性の割れ目から汲みだされる黒川温泉と養父温泉でも 668~1,000 mg/kg の蒸発残留物を含む。である。これは、周辺に熱水鉱床が発達していることと共に、縫合帯の温泉の特徴を示している。現状の地質構造が出来たのが古いことから冷却が進み、但馬・丹後の火山地帯に比べると、地温勾配が丹波帯と同じく低く高温泉 (42℃以上) が見られない。

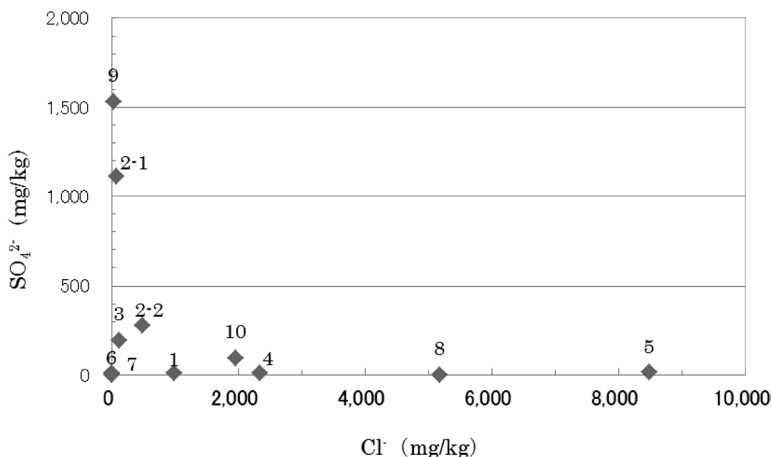


Fig. 6 Relation between chloride ion and sulfate ion contents of hot spring waters along Maizuru belt (Numbers are shown in Fig. 1).

図 6 舞鶴帯の温泉水の塩化物イオンと硫酸イオンの相関 (図中の番号は Fig. 1 に対応する)。

Table 2. Quality of hot springs along Maizuru belt (Numbers are shown in Fig. 1).

表 2 舞鶴帯の泉質分布 (表の番号は Fig. 1 の番号に対応する)。

	温泉の番号
ナトリウム-炭酸水素塩・塩化物泉	①, ②-1
ナトリウム-炭酸水素塩・硫酸塩・塩化物泉	②-2
ナトリウム-炭酸水素塩・硫酸塩泉	③
ナトリウム・マグネシウム-塩化物・炭酸水素塩泉	④
ナトリウム・カルシウム・マグネシウム-硫酸塩・塩化物泉	⑩
ナトリウム-塩化物泉	⑤
カルシウム-硫酸塩泉	⑨
ナトリウム-カルシウム塩化物泉	⑧
アルカリ性単純泉	⑦
単純泉	⑥

注) 番号は表 1 参照

4. 活動時代の古い縫合帯の舞鶴帯の温泉のまとめ

西南日本内帯の第四紀の火山活動が見られる但馬、丹後には、高温の温泉が見られるが、その基盤は、古生代・中生代の堆積岩とそれに貫入する花崗岩体で、その南側に舞鶴帯、超丹波帯、丹波帯と分布する。20 数年前までは舞鶴帯、超丹波帯、丹波帯では、温泉が得られにくいと言われていた。この 25 年の間に、綿密な温泉調査（地質・物理探査）を行い縫合帯である舞鶴帯で、掘削により温泉が得られている。

その特徴をまとめると

- ① アトラス山脈、ザクロス山脈・アルボルツ山脈の縫合帯は現在の地震帯であるが、舞鶴帯は現在では地震が起こらなくなっている。しかし、縫合帯の構造は残っている。地温勾配が 2.5～3.0℃/100 m と充分冷却されていて、大深度掘削でやっと 25℃以上の温泉が得られている。
- ② ザクロス山脈・アルボルツ山脈のような縫合帯では、現在熱水活動が見られ、比較的小規模の単純な熱水鉱床が見られるが、舞鶴帯では生成年代が古く、生野・明延・大身谷鉱床で代表されるように多金属熱水鉱床が見られる。
- ③ 舞鶴帯の温泉の化学的特徴は、含有成分が多様で多量含む。蒸発残留物も多い。ただ、若い縫合帯の温泉に比べて二酸化炭素の含有は少ないが、炭酸水素塩（重曹）を多く含有する。
- ④ 舞鶴帯の温泉は、揚湯量が少ないことが多いが、揚湯管が沈殿により閉塞することが少ない。ことが挙げられる。

引用文献

- 石渡 明 (1978) : 舞鶴帯南帯の夜久野オフィオライト概報. 地球科学, **32**, 301-310.
- Kishimoto, Y. (1981) : On precursory phenomena observed at the Yamasaki Fault, Southwest Japan, as a test-field for earthquake prediction. In Earthquake Prediction—An International Review. Maurice Ewing Series 4, pp. 510-516, Am. Geophys. Union.
- 神戸新聞総合出版センター (編) (2003) : ひょうごの温泉 (新版). 図書印刷, 175 頁, 神戸.
- 松下 進 (1950) : 京都府地質誌. 地学, **2**, 41-49.
- 中村 威 (1987) : 近畿地方の金属鉱床の分布. 日本地質 **6**, 近畿地方 (中沢・市川・市原編), 217 頁, 共立出版, 東京.
- 西村 進 (2012) : 大陸縫合帯 (Suture zone) の温泉 (1) —アルジェリアのアトラス山脈の温泉—. 温泉科学, **62**, 188-199.
- 西村 進, 赤松 信 (2011) : 兵庫県のいくつかの温泉と地質構造. 温泉科学, **61**, 25-32.
- 西村 進, 高松信樹, 川崎義巳 (2012) : 大陸縫合帯 (Suture zone) の温泉 (2), イランの温泉. 温泉科学, **62**, 251-266.
- 清水大吉郎 (1987) : 舞鶴帯・上郡帯及び周辺の地質図. 日本地質 **6**, 近畿地方 (中沢・市川・市原 代表編), 8 頁, 共立出版, 東京.