



Title	3. 本邦における温泉分布から見た温泉の熱の起源
Author(s)	福富, 孝治; FUKUTOMI, Takaharu
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 23, 15-28
Issue Date	1970-03-18
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.23.15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13971
Type	departmental bulletin paper
File Information	23_p15-28.pdf



3. 本邦における温泉分布から見た温泉の熱の起源*

福 富 孝 治

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和 44 年 10 月受理 —

I. 序 言

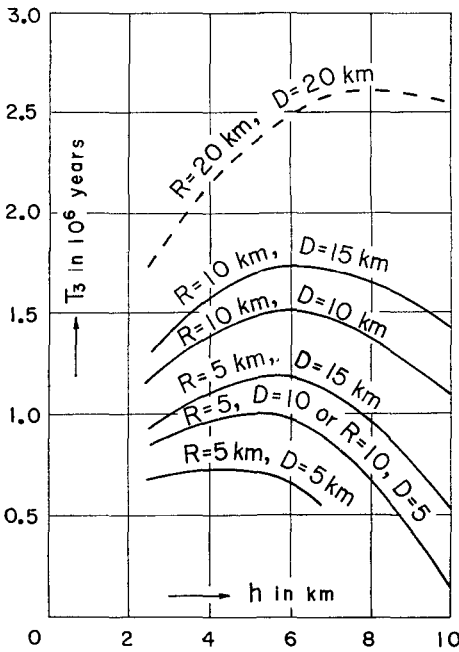
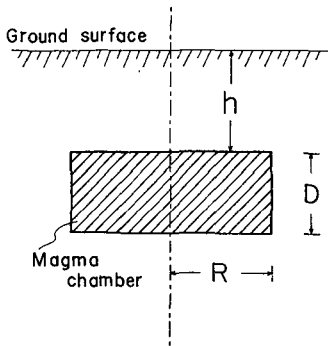
本邦では第四紀の火山帯に沿って温泉が密集して分布していることは周知の通りであるが、この地帯の大部分は新第三紀中新世から鮮新世にかけて火山活動の場であったことも知られている。活火山が溶岩を流したり高温な噴気を発散したりすることから、その地下に高温な岩漿溜りの存在が推定され、また地震学や地磁気学の研究からも実証されている。それで、火山帯を構成する火山岩あるいはその地下に潜在する岩漿またはその固化した高温な火成岩から温泉の熱が供給されているとする想定が火山帯に沿って温泉密度が大きい事実の最も可能な説明としてあげられるのである。

この場合、問題となるのは現在の温泉の熱が新第三紀から第四紀までのどの期間の火山活動あるいは地下の火成活動に関係があるのかということである。筆者は曾ってこの疑問を検討するために、地下数 km の深さにより深い所から貫入した高温な岩漿を考え、これが熱伝導により冷却しながら水蒸気を放出して固化するまでの年数と、またさらに冷却を続ける過程において深層地下水を熱して温泉を形成しうる年数との和 T_3 が地表から岩漿までの深さ h 、岩漿溜りの形を円筒状と考えてその半径 R と厚さ D とによって如何に変わるかを理論的に考察した¹⁾。その結果は第 1 図に示したが、岩漿の貫入温度を 1200°C 、固結温度を 900°C 、岩漿の潜熱を 90 cal/g 、周囲の岩石の熱伝導率を $5.4 \times 10^{-3} \text{ cal/deg-cm-sec}$ などとし、 T_3 は岩漿貫入から岩漿固化後地表における地中温度の鉛直方向の勾配が普通の値 $30 \times 10^{-5} \text{ deg/cm}$ の 2 倍に低下するまでの年数としている。その結論は、地下岩漿の深さと大きさの可能な最大値に対し、温泉を形成しうる年数の最大値は地下岩漿の貫入後 260 万年間程度であること、換言すれば、新第三紀末の鮮新世の最後の 160 万年間ぐらいと第四紀の 100 万年の範囲におこった火成活動が現在の温泉の熱源として可能であろうということである。地質学者の調査を総合すれば、第三紀の火山活動が盛んであったのは主として中新世から鮮新世初期すなわち過去へ 1000~2500 万年の時代であったという。したがって、温泉密度が火山帯に沿って大きいということは主に第四紀火山帯について成り立つということになる。

しかし、地質学者の中には上記の地下火成活動による温泉の寿命の理論値は短か過ぎるの

* 日本温泉科学会 No. 22 大会 (昭和 44 年 7 月 30 日) において発表。

1) T. FUKUTOMI; Possibility of Volcanic Hot Springs of Meteoric and Magmatic Origin and Their Probable Life Span, Jour. Faculty Sci., Hokkaido Univ., (Geophysics), 1 (1960), 223.



第1図 地表下 h にある半径 R 厚さ D の円筒状岩漿とその固化体による温泉の寿命の概値

Fig. 1. Order of magnitude of the life span for hot springs originated from a cylindrical magma and its solidified body underlying at h below the ground surface and having radius R and thickness D ,

ではないかという疑問をもつ人が少なくないようである。これらの見解は温泉が地表に湧出する場所とその付近の岩石の地質学的研究に主に依存している。例えば、小林²⁾はこのような見地から、本邦温泉総数のおよそ80%は第四紀火山岩から、約20%は第三紀および中生代以前の火成岩から熱を受けているとしている。

もし先に述べた理論的計算値が妥当でないとするれば、岩漿周囲の岩石の熱伝導率として 5.4×10^{-3} c.g.s. (花崗岩等に相当) を採用しているので、地殻上層の岩石の熱伝導率の値がこれよりもやや小さい場所では温泉の寿命の値が幾分大きくなることであろう。しかし、古第三紀以前といえば現在からおよそ2500万年以前であって、このように古い火成岩に対してまで上記の理論的考察の結果を否定することはむづかしいことである。

兎に角、この問題を解明するには、前に述べたような理論的計算以外にさらに何か他の実質的な資料によって論ずることが望ましいので、本論文では本邦の温泉の分布密度からこの問題を検討することを試みたのである。この際

(A) 多くの温泉の熱の起源は岩漿または固火岩漿からの放熱である。

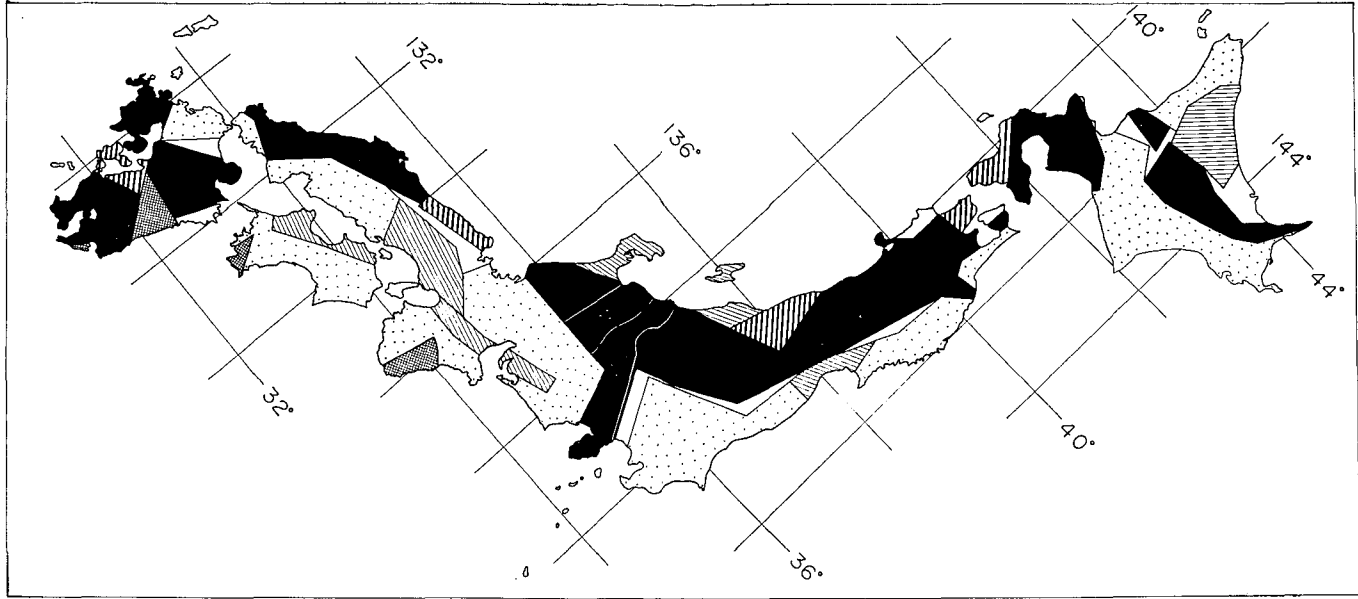
(B) 少なくとも古第三紀以前の火成岩は見解(A)の下では温泉の熱源とはなりえない。

という仮定の下に新第三紀火成岩が温泉の熱源として可能であるか否かを論じたのである。

また、一般に堆積岩と古第三紀以前の火成岩中に湧出する温泉に対しては如何なる温泉の熱源

を考えたらいいかについても多少の論議を行なった。

2) 小林儀一郎; 本邦温泉の地質学的分類並に温泉湧出と地質構造線との関係, 温泉科学 1 (昭16), 59.



第2図 本邦における第四紀火山岩，新第三紀火成岩の分布によって分けた5区域

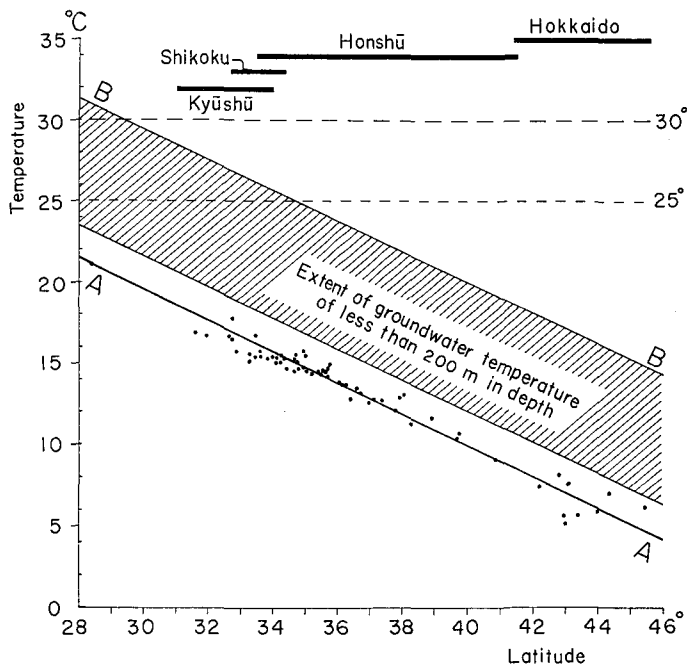
Fig. 2. Five districts in Japan characterized by the distribution of Quaternary volcanic rocks and Neogene igneous rocks.

II. 地質時代と岩種によって分けた5区域内の温泉地密度

地質の資料としては商工省地質調査所発行の日本地質図(昭31)を用いたが、同じく本邦温泉分布図(昭33)に記載の地質を参考とした。

地質図によれば、第四紀火山岩の露出は小面積のものが点々として分布しているが、これらは群状あるいは帯状に密集していることが多い。これらの群または帯の最も外側にある露出に外接するような直線の集合で群または帯の輪郭線を引きこれで囲まれる地域を本論文では区域と呼んだ。これは、これら群または帯内の第四紀火山岩は地下ある深さ以下では一連の火成岩として連絡しているか、少なくとも熱的には連絡していると考えたのである。第四紀火山岩に対するこの区域を(I)として第2図中に黒く塗りつぶして示した。

これと全く同様の操作を新第三紀火山岩にも適用したが、この場合3種の区域に分けた。すなわち、(I)の区域外の新第三紀火山岩の群または帯の区域に対して、これが第四紀火山帯の直ぐ延長上にある場合を区域(II)とし第2図中に太い斜線で表わした。次に、かなり広い面積の新第三紀火山岩の区域で第四紀火山帯の延長とは到底考えられない区域を(III)としこれを図中に細い斜線を施して示した。また、(I)の区域の直ぐ外側に接して新第三紀火山岩の小区域が存在する場合には、これを(II)とするか(III)とするかの判断がむづかしいので、このような



第3図 本邦における年平均気温(AA)および年平均気温+10°C(BB)の値と緯度との関係

Fig. 3. Change of the mean annual air temperature (AA) and the value of (AA +10°C) due to variation of the latitude in Japan.

場合は何れの区域にも入れずに第2図中に余白として残した。

次に、(III)と他の条件は同様であるが、新第三紀火山岩の代りに新第三紀貫入岩がある場合の区域を(IV)とし図中に交叉した斜線で示した。さらに、前に述べた区域外で古第三紀以前

第1表 5区域に属する各区域の面積、温泉地数および温泉地密度

Table 1. Area, numbers of hot spring localities and density of hot spring locality of the respective districts contained in five large districts.

区域の記号 Notation of large district	区域の地質特性 Geological characteristics of the district	各区域名 Name of respective district	面積 Area ×10 ³ km ²	温泉地数 Numbers of hot spring localities in the area %	温泉地密度* Density of hot spring locality %
(I)	第四紀火山岩区域 (但し、区域の大部分には新第三紀火山岩が重複)	知床—大雪火山区域	12.03	10.1	0.837 ◎
		那須、鳥海火山帯地域	65.39	49.0	0.884 ◎
		富士火山帯区域	12.66	7.6	0.600 ◎
		乗鞍火山帯区域	6.78	3.0	0.443 ○
		白山火山区域	8.34	2.3	0.276 △
		大山火山区域	10.40	5.0	0.476 ◎
		阿蘇—国東火山区域	9.50	4.8	0.502 ◎
		霧島火山区域 雲仙火山区域	9.90 4.20	5.1 1.4	0.517 ◎ 0.356 ○
(II)	新第三紀火山岩区域 (第四紀火山岩の露出はないが、第四紀火山帯の延長上にある)	北海道西南部—青森県西部	4.28	1.2	0.290 △
		米沢西方区域	6.30	1.4	0.224 △
		鳥取—丹後半島区域	2.81	1.4	0.502 ◎
		天草—八代区域	2.46	1.4	0.574 ◎
(III)	新第三紀火山岩区域 (第四紀火山岩の露出もなく、第四紀火山帯と無関係)	北海道北東部	10.42	0.17	0.016
		新潟—佐渡—能登区域	8.18	0.53	0.065
		仙台付近	3.14	0.00	0.000
		兵庫—奈良	10.23	0.53	0.052
		瀬戸内旧火山帯	8.22	0.53	0.064
(IV)	新第三紀貫入岩区域 (III)と同様	紀州南端	2.74	0.53	0.193 △
		四国足摺付近	0.72	0.00	0.000
		日向	3.40	0.00	0.000
		大隅半島	0.40	0.00	0.000
(V)	古第三紀以前の火成岩または地質時代に無関係に堆積岩の区域	北海道北西部	6.94	0.17	0.024
		北海道太平洋岸	24.47	0.36	0.015
		陸奥半島	2.44	0.00	0.000
		岩手県東部	9.88	0.00	0.000
		関東—平付近	24.10	0.89	0.037
		紀州南西部	7.00	1.59	0.227 △
		中部地方南部	26.09	0.53	0.020
		中国地方南半部	13.46	0.17	0.013
		四国南東部	13.48	0.00	0.000
		筑前	4.28	0.36	0.084

* 面積 10³ km² 当りの温泉地数 (%), ◎ 温泉地密度が 0.45 以上の区域, ○ 温泉地密度が 0.45 以下で 0.30 以上の区域, △ 温泉地密度が 0.30 以下で 0.15 以上の区域

の火成岩の区域、あるいは広い面積が地質時代に関係なく堆積岩で覆われている区域を併せて区域(V)とし図中に点々を打って示した。

このような操作を地質図上で日本全土に亘って行なったが、面積が淡路島以下の島に対しては省略した。

次に温泉についての資料は商工省地質調査所発行の本邦温泉分布図(昭33)、厚生省国立公園部編日本鉱泉誌(昭29)、鉄道省編温泉案内(昭15)、日本温泉協会編日本温泉大鑑(昭16)および各地方温泉に関する研究報告によった。

通常、温度に関しては 25°C 以上を温泉として定義しているが、本論文では 30°C 以上を温泉として採用した。近年地下水用 boring の深度が段々深くなり200 m 程度の深さの井戸数は決して少なくない。この深さの普通の地下水温度³⁾は最高で(年平均気温 $+10^{\circ}\text{C}$)と推定されている。第3図は本邦における緯度と年平均気温(図中 AA 線)および(年平均気温 $+10^{\circ}\text{C}$) (図中 BB 線)との関係を示す図であるが、図から判るように後者の値は九州・四国および緯度 34.5° 以南の本州では $25^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{C}$ の範囲内の値であるから、通常の設定によればこれらの土地の深さ200 m ぐらいの地下水は温泉となる場合があることになる。このように、普通の土地で深さ200 m ほどの boring によって得られる地下水を温泉と考えることは適当ではないので、本論文では温泉の温度基準を 30°C としたのである。

さて、前に述べた5区域(I), (II), ..., (V)のそれぞれに属する各区域について、その面積とその域内に存在する温泉地数を求め第1表に示した。但し、温泉地数は上記5区域全体の温泉地総数(上記資料では566)に対する百分率で表わした。また、ある区域内の温泉分布の疎密を他区域と比較するために、各区域の面積を 1000 km^2 に換算したときの温泉地数(%)を温泉地密度と定義してこの値を第1表中に示した。表の32区域の内過半数に当たる17区域では温泉地密度が0.1以下の小さい値であった。温泉地密度がこれらよりも大きい区域を明らかにするために、この値が0.45以上の大きいものに対しては二重丸を、0.30~0.45の範囲のかなり大きい区域に対して一重の丸を、0.15~0.30の相対的にやや大きい区域に対しては三角印を便宜上表の温泉地密度の値のあとに付けた。

次に、(I)~(V)の各全区域における温泉地数、温泉地密度の値と、(I)から(V)までの総区域に対するこれらの値(最下欄)を第2表に示した。

第1表から判るように、温泉地密度は(III), (IV)および(V)の区域では紀州南端と南西部の2区域でやや大きいこと(この原因については第III章3節で吟味した)を除けば、他のいずれも0.1以下の小さい値であるが、(I)と(II)の区域では例外なく0.22~0.88という大きい値を示している。このことは、第2表に示されるように、(I)~(V)の各全区域について計算された温泉地密度の値を見ればさらに明瞭である。

(III)と(IV)の区域は、第1表の区域の地質特性の欄に記したように、火山岩か貫入岩かの

3) 福富孝治; 微温泉と冷泉との境界温度, 北大地球物理学研究報告 2 (昭27), 17.

第2表 5区域の面積, 温泉地数および温泉地密度

Table 2. Area, numbers of hot spring localities and density of hot spring locality of 5 large districts.

区域の記号 Notation of Large district	区域の地質特性 Geological characteristics of district	面積 Area S ×10 ³ km ²	温泉地数 Numbers of hot spring localities N %	温泉地密度 Density of hot spring locality D %
(I)	(第1表と同じ)	139.2	88.2	0.634 ◎
(II)	(第1表と同じ)	15.85	5.4	0.340 ○
(I+II)	第四紀火山岩の区域または第四紀火山帯の延長上に当る区域, 但し大部分では新第三紀火山岩が重複している	155.1	93.6	$(D_{(I+II)})$ 0.605 ◎
(III)	(第1表と同じ)	40.19	1.76	0.044
(IV)	(第1表と同じ)	7.26	0.53	0.073
(III+IV)	新第三紀火成岩の区域, 但し第四紀火山岩の露出もなく, 第四紀火山帯とも無関係と思われる	47.45	2.29	$(D_{(III+IV)})$ 0.048
(V)	第1表と同じであるが, 仮定(B)により特種熱源のない普通の地域と考えられる	132.14	4.07	$(D_{(V)})$ 0.031
全 域	—	334.7	100.0	0.297**

** 温泉地密度の全域に対する値

違いがあるだけでどちらも新第三紀火成岩の区域で他の条件は同一であるから, この両区域を合併して区域(III+IV)としその温泉地密度を求めると, 第2表のように, 0.048という値が得られる。

区域(II)は区域(III+IV)と同様に新第三紀火成岩の区域であるが, この温泉地密度は0.340で(III+IV)の値のおよそ7倍にも当たり, むしろ区域(I)の値に近い。(II)と(III+IV)との地質特性は第四紀火山岩の露出がないことでは同様であるが, (II)は第四紀火山帯の延長上にあると推定されることが相違している。すなわち, (II)の地下には第四紀火成岩が潜在していると考えれば, 温泉地密度の相違を都合よく説明することができる。このような理由から, (I)と(II)の区域も合併して区域(I+II)と考え, その温泉地数と温泉地密度を第2表のように計算した。

区域(V)については, 温泉地密度が0.031で区域(III+IV)と共に小さい値であるが, 詳細に言えば(III+IV)よりもその値がやや小である。(V)は古第三紀以前の火成岩または地質時代に無関係に堆積岩の区域であるが,

第3表 (I+II), (III+IV)および(V)の3区域における温泉の温度の頻度分布の比較

Table 3. Comparison of frequency distribution of hot spring temperature among the districts (I+II), (III+IV) and (V).

温 度 (°C)	区 域 (%)		
	(I+II)	(III+IV)	(V)
30~ 50	40	69	83
50~100	60	31	17

第 I 章の仮定 (B) によれば、地下に潜在する特殊熱源のない普通の地域と考えられる。しかし、このような区域 (V) においても 30°C 以上の温泉が皆無ではないことは注意に値する。

次に、(I+II), (III+IV) および (V) の 3 区域に湧出する温泉の温度を統計的に比較してみると第 3 表の結果が得られた。

すなわち、区域 (I+II) においては 50°C 以上の高温な温泉が多いが、区域 (III+IV) と区域 (V) においては 50°C 以下の温泉が多く、特に (V) ではこの傾向が著しいのである。

III. 本邦における温泉の熱の起源

1. 第四紀または新第三紀火成岩を熱源とする温泉

区域 (I)~(V) の全域において、第四紀火成岩を熱源とする温泉地数および温泉地密度をそれぞれ N_q および D_q 、新第三紀火成岩を熱源とすると思われる温泉地数および温泉地密度をそれぞれ N_t および D_t 、これらの特殊熱源のない普通の土地の地下熱に起因する温泉地数および温泉地密度をそれぞれ N_n および D_n 、区域 (I+II), 区域 (III+IV), 区域 (V) の温泉地密度をそれぞれ $D_{(I+II)}$, $D_{(III+IV)}$, $D_{(V)}$ 、区域 (I), (II), (III), (IV) および (V) の面積をそれぞれ $S_{(I)}$, $S_{(II)}$, $S_{(III)}$, $S_{(IV)}$ および $S_{(V)}$ とする。但し、面積は 10^3 km^2 を単位として表わした値とする。

区域 (I) 内に露出するかあるいは地下に潜在する新第三紀火成岩は (I) のほぼ全域に亘って存在すると考えられるから、温泉地密度については次の関係がある。

$$D_q + D_t + D_n \simeq D_{(I+II)} \quad (1)$$

$$D_t + D_n = D_{(III+IV)} \quad (2)$$

$$D_n = D_{(V)} \quad (3)$$

故に、

$$D_t = D_{(III+IV)} - D_{(V)} \quad (4)$$

$$D_q \simeq D_{(I+II)} - D_{(III+IV)} \quad (5)$$

また、温泉地数 (%) については次の関係がある。

$$N_q = D_q \{S_{(I)} + S_{(II)}\} \quad (6)$$

$$N_t \simeq D_t \{S_{(I)} + S_{(II)} + S_{(III)} + S_{(IV)}\} \quad (7)$$

$$N_n = D_n \{S_{(I)} + S_{(II)} + S_{(III)} + S_{(IV)} + S_{(V)}\} \quad (8)$$

(3), (4) および (5) 式において、右辺の各地域の温泉地密度は第 2 表のように判っているから、 D_n , D_t および D_q の値は第 4 表のようにきまる。また、(6), (7) および (8) 式の右辺括弧内各項の面積は第 2 表に与えられているから、第四紀火成岩、新第三紀火成岩をそれぞれ熱源とする温泉地数 N_q および N_t と、普通の土地の地下熱に起因する温泉地数 N_n の値も第 4 表に示したように求められる。

すなわち、温泉地密度として $D_q=0.556\%$, $D_t=0.017\%$, $D_n=0.031\%$ が得られた。これ

第4表 本邦において第四紀火山岩, 新第三紀火成岩および普通の土地の地下熱をそれぞれ熱源とする温泉地数 (%) および温泉地密度 (%)

Table 4. Numbers of hot spring localities (%) in Japan and the density of hot spring locality (%), of which heat source is Quaternary volcanic rocks, Neogene igneous rocks or underground heat in normal place.

温泉の熱の起源と考えた岩石名 Name of rock which is supposed to be origin of heat of hot springs	その岩石が占める区域 Districts containing the rock	その面積 Area S ×10 ³ km ²	その面積中の換算した温泉地数 Numbers of hot spring localities N %	換算温泉地密度 Density of hot spring locality D %
第四紀火山岩	(I)+(II)	155.1	(N _q) 86.2	(D _q) 0.556 ©
新第三紀火成岩	(I)+(II)+(III)+(IV)	202.6	(N _t) 3.4	(D _t) 0.017
以上を除いて熱的に普通と考えられる岩石	全 域	334.7	(N _n) 10.4	(D _n) 0.031

は、例えば第四紀火山岩の区域内の或る面積中に新第三紀火成岩を熱源とする温泉地が1個所あるとすれば、その面積中には通常の土地の地下熱に起因する温泉地が約2個所と第四紀火成岩を熱源とする温泉地が約33個所が共存することを意味する。したがって、第四紀火山岩の区域に関する限りでは、第四紀火成岩を熱源とする温泉地が圧倒的に多く他の成因はほとんど問題にならない。

次に、(I)から(V)までの全域内に存在する温泉地数は、第4表に示されるように、 $N_q=86.2\%$ 、 $N_t=3.4\%$ 、 $N_n=10.4\%$ である。すなわち、この全域に存在する温泉地総数のおよそ86%は第四紀火成岩を熱源とする温泉地であり、およそ3%が新第三紀火成岩を熱源とするもの、およそ10%がこのような特殊熱源ではなく普通の土地の地下熱に起因するものという結論になる。(I)から(V)までの全区域の面積は、第4表に示したように、 $335 \times 10^3 \text{ km}^2$ であり、これは本論文で取り扱った本州、北海道、九州、四国、佐渡の総面積 $361 \times 10^3 \text{ km}^2$ の約93%に当る。したがって、以上に得た結論は、その大勢としては、本邦全域の温泉熱の起源に対する結論であると言っても差し支えない。

第四紀火成岩を熱源とする温泉地が本邦全域の温泉地総数のおよそ86%を占めているという結果は第I章に述べた理論的考察ともよく一致する。新第三紀火成岩を熱源とする温泉地は僅かに3%に過ぎないのでこれを誤差として無視することもできるかも知れない。しかし、これが意味のある数字である場合には、これらの温泉は新第三紀鮮新世末の百数十万年の期間の火成活動によるものであると考えれば理論的考察とは矛盾しない。また、第四紀火成岩の区域にある温泉の温度は50°C以上の場合が60%を占めていたのに、新第三紀火成岩の区域の温泉については温度が30°~50°Cの場合が69%を占めていたという事実とも合致する。

2. 普通の地下増温率を示す地域内の温泉

さて、ここで問題となるのは、上記のように地下の岩漿とその固化した高温な火成岩を熱源とする場合ではなく、古第三紀以前の既に冷却した火成岩の地域あるいは地質時代を問わず

堆積岩地域等から湧出する温泉が全国の温泉地総数のおよそ10%も存在することを如何に説明するかである。

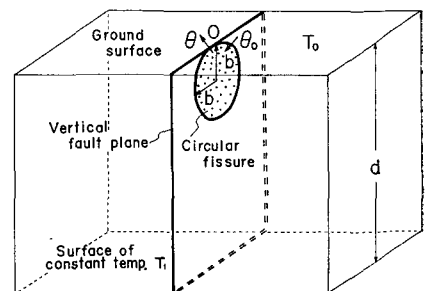
例えば造山運動による皺曲熱，Mantle から地殻を通して伝ってきた異常な熱流等どんな熱であってもよいが，先に述べた熱源以外のある地下特殊熱源によってこの温泉が成生されているとすれば，地表における地殻熱流量の値はその平常値と比較して必ず正の異常を呈するはずである。上田・宝来の研究⁴⁾によれば，第四紀火山帯を含む本邦島弧の内帯と富士火山帯に沿って正の異常が認められるが，外帯の内陸域では格別の正の異常は認められていない。しかし，この地域，すなわち本論文中に区域(V)とした地域にも温度はあまり高くはないが温泉が認められることは前に述べた通りである。

このような理由で，筆者は地殻熱流量には正の異常はなく，したがって地下に特殊な熱源のない普通の地下増温率の土地を考え，このような場合に如何にして温泉が成生されるかを以下に検討した。

このような温泉の水の起源は地下水と考えるのが妥当である。地下水が地下深く入って再び出てくるためには通路が必要であり，その通路となるのは岩石中の割れ目であることが多い。普通の地下水がこのような地下の割れ目を流動する途中で熱を受けて再び地表に湧出する場合，普通の土地の地下増温率と1温泉地の実際の湧出量に対しては 40°C を越えるような温泉は生じ難いと言われている⁵⁾。

普通の土地において，割れ目内を流動する地下水の存在する深さの限度はあまり判然としていないが， $2\sim 3\text{ km}$ と言われている。しかし，本邦のように地殻変動が激しく地震が頻発する地域では岩石中の割れ目が普通の場合よりも深く，しかも1つの割れ目の面積も厚さも大きい場合もあるであろう。従って，この割れ目内を流動する地下水は普通の場合よりは広い面積を流動して深い所まで達することが推察される。故に，このような地下水が割れ目の壁の岩石から熱せられ地表に湧出する場合には普通の割れ目の場所よりも温度が高いことが期待されるであろう。この様な考えから，第4図に示した模型について温泉温度の推定を試みた。

図において地表面では温度は常に T_0 ，地表面から深さ d に地面に平行な恒温面があってその温度は T_1 に保たれているとする。1鉛直面内に地面に接するうすい円板状の割れ目があって，その半径すなわち地面からその中心までの深さを b とする。円板状割れ目には外から温度 θ_0 で流量 q の地下水がたえず流入して



第4図 円形の鉛直割れ目の模型

Fig. 4. A schematic representation of the assumed model of a vertical fissure of circular shape.

4) Seiya UYEDA and Kiichi HÔRAI; Terrestrial Heat Flow in Japan, J. G. R. 69 (1964), 2121.

5) 福富孝治; 地下水起源の温泉の温度, 北大地球物理学研究報告 13 (昭40), 53.

円板状壁を通じて熱伝導で外側の岩石から熱を受けて温度が上昇し平均温度 θ の温泉となって地表へ流出するものと仮定する。水および温泉の密度を ρ 、比熱を c 、岩石の熱伝導率を κ 、円周率を π とすれば熱の流れが平衡状態になったとき生じた温泉の温度 θ は、福富の研究結果⁶⁾を少し変形すれば近似的に次式で表わされる。

$$\theta = \theta_0 + \left\{ \gamma b - (\theta_0 - T_0) \right\} \left\{ 1 + \frac{q^0 c}{\pi \kappa b} (1.0472 + R) \right\} \quad (9)$$

但し、

$$R = \sum_{s=1}^{\infty} \left\{ 2 \sin^{-1} \left(\frac{b}{2sd} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{b}{2(sd-b)} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{b}{2(sd+b)} \right) \right\} \quad (10)$$

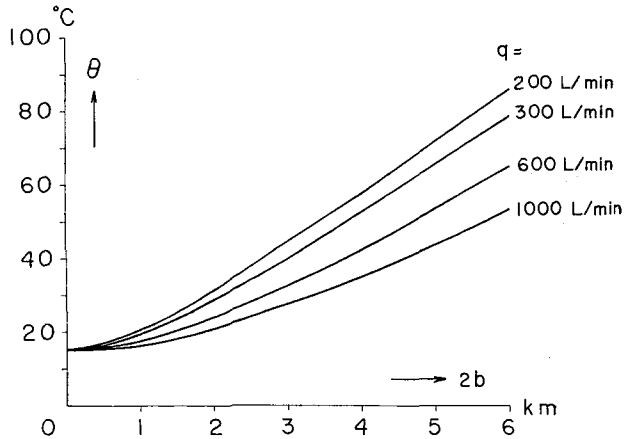
$$\gamma = (T_1 - T_0) / d \quad (11)$$

である。

いま、地表温度 T_0 としては本邦の中緯度に当たる緯度 37° における地表温度の年平均値 15°C を採用し、割れ目に流入する地下水温度 θ_0 は地表温度に等しいと仮定すれば $\theta_0 = T_0 = 15^\circ\text{C}$ である。 d の値は地表から円板状割れ目の下底までの深さ $2b$ よりも大であればよいわけであるが、 d が大きいほど R の値が小になって計算に好都合であるから、ここでは $d = 30 \text{ km}$ を採用する。 γ は割れ目から充分離れた地点において深さに対する地温の増加率であるが、ここでは普通の土地の値として $\gamma = 30 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C/cm}$ を採用する。したがって、(11) 式から $T_1 = 915^\circ\text{C}$ となる。 $\rho c = 1$ 、岩石の熱伝導率としては火山岩の値を用いて $\kappa = 3.5 \times 10^{-3} \text{ c.g.s}$ とおく。地下水起源の温泉には熱階級⁷⁾ **III** 以下の温泉が多いことが推察されているが、北海道の各温泉地の湧出量を熱階級別に平均してみると熱階級 **III** では 730 L/min 、**II** では 290 L/min 、**I** では 210 L/min となるから、ここでは温泉の湧出量を $200, 300, 600$ および 1000 L/min とし、鉛直な円板状割れ目の下底の地面下の深さ $2b$ を $0 \sim 6 \text{ km}$ として計算した。

第5図はこのような機構によって生じた温泉の温度 θ が湧出量 q や円板状割れ目の底の深さ $2b$ によって如何に変わるかを示したものである。

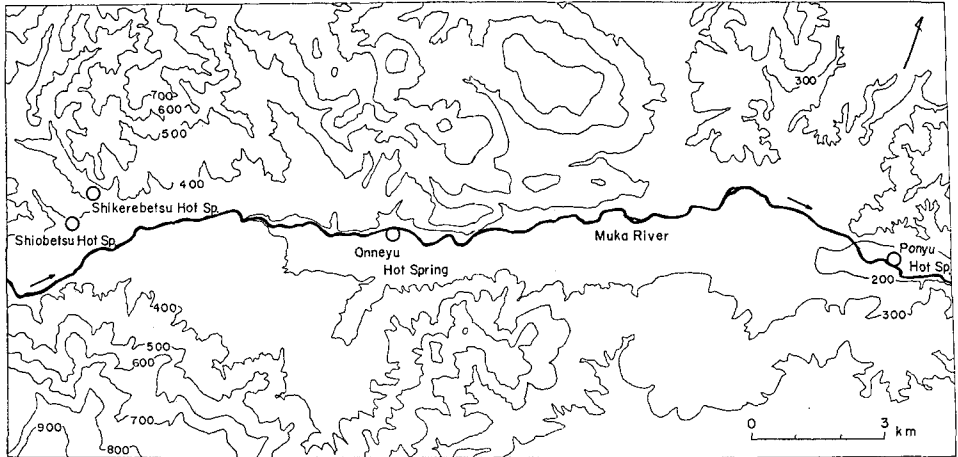
北海道の温泉地で割れ目から湧出するもの11地域について調べたところ、温泉水の通路となっている



第5図 第4図の模型の場合に生ずる温泉の温度
 Fig. 5. Temperature of hot springs θ originated from the model indicated in figure 4.

6) 福富孝治; 5)と同じ.

7) 福富孝治; 5)と同じ.



第6図 北海道の温根湯付近の地形略図(数字は高度 m)

Fig. 6. Topographical map near Onneyu hot springs in Hokkaido.

1 温泉地域内の割れ目の長さは 0.45~2.1 km であった。割れ目の深さ $2b$ もこれと同程度と仮定すれば、第5図から判るように、 35°C 以上の温度の温泉は上記のような機構では期待できない。しかし、前に述べたように割れ目の大きさや深さが 3 km よりもかなり大きく、その中を地下水が流動可能であれば、第5図から判るように、その湧出量が非常に大でなければ温度が $40^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{C}$ の温泉も存在可能である。このような大きな割れ目は1温泉地域では殆んど見られないが、いくつかの温泉地を連ねるような割れ目は期待できる。1例をあげると、北海道の北見温泉、温根湯温泉、塩別、シケレベツ温泉等⁸⁾は無加川の谷に沿って存在するが、この谷が 25 km 以上に亘ってほぼ直線状であることは断層谷であることを暗示しそれに沿って各温泉地を地下で連絡するような割れ目の存在が期待される(第6図参照)。

すなわち、地下に特別な熱源がないと思われる全国温泉総数のおよそ 10% に当たる温泉の熱的成因は上記のような機構を考えれば一応説明可能である。

3. 紀州南部の温泉群

第1表において、区域(I)および(II)では温泉地密度は例外なく 0.2 以上の大きな値であったが、(III)、(IV)および(V)の3区域においては紀州の南端と南西部の2区域がそれぞれ 0.193 と 0.227 で比較的大きい値であることを除けば、他は 0.1 以下の小さい値であったことを先に指摘した。第7図には紀州南部における温泉分布を示したが、黒丸は 30°C 以上の温泉で丸につけた数字は温度である。参考として、付近にある 29°C の微温泉の位置を白丸で示しておいた。これらの温泉の分布を見ると、図に点線で囲ったようなやや帯状の分布をなしており、特に紀州南部には $70^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{C}$ の高温な温泉が数箇所ある。しかも、この帯状分布の延長は乗鞍火山

8) 福富・藤木・須川・大谷・和田；温根湯，北見，塩別，シケレベツ諸温泉の調査，北海道衛生部編，北海道温泉調査 19 (昭 37)，43。

帯に沿う温泉地密度の大きい部分へ連絡しているように見える。もし、このような見方が正しければ、紀州南部の温泉地密度のやや大きい区域の地下には第四紀火成岩が潜在している疑いが考えられるから、この2区域を(II)に編入するのが適当であるかも知れない。

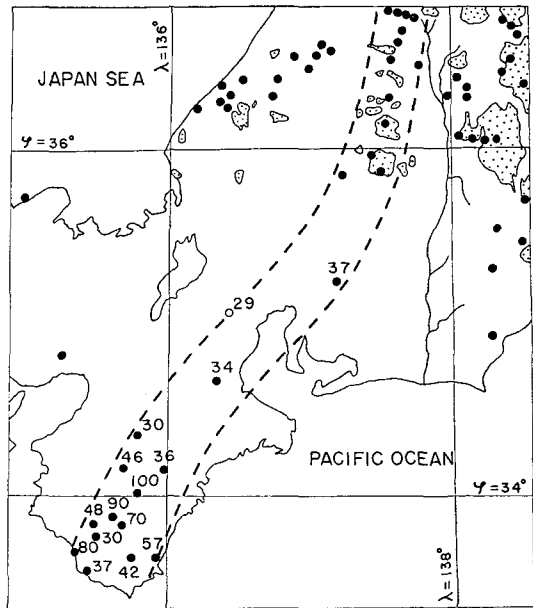
しかし、これは単に温泉分布からのみ示唆されることであって、このように考えることができれば本節の初めに述べた例外がなくなって推論上都合がよいというに過ぎない。

IV. 総括

本邦の温泉の多くは地下に潜在する岩漿またはその固化した高温な火成岩を熱源としていると考えられている。しかし、この岩漿の貫入した地質時代が現在からどのくらい古い年代まで可能であるかについては異論がある。

本論文では本邦における温泉地の分布密度と地質との関係から主としてこれを検討した結果、次のような結論を得た。

- 1). 本邦における温泉地総数のおよそ86%は第四紀火成岩を熱源とする温泉であり、およそ3%が新第三紀特に鮮新世末期の火成岩を熱源とする温泉であろうことを指摘した。
- 2). また、本邦温泉地総数のおよそ10%は地下に潜在する岩漿またはその固化した高温な火成岩等特殊な熱源によるものではなく、普通の地下増温率の土地の地下熱に起源を有する温泉であろうことを指摘し、このような機構の下で普通の地下水が岩石中の大きな割れ目を伝って地下3~6kmの深さまで流動すると仮定すれば、湧出量がおよそ1000 L/min以下であれば温度50°~90°Cの温泉の生成は充分可能であることを理論的に示した。このように深い所まで地下水の流動がおこるような大きい割れ目の存在は、本邦のように地殻変動の激しく大地震の頻発する地域では可能であろうと筆者は考えている。



第7図 紀伊半島付近における30°C以上の温度の温泉分布

Fig. 7. Geographical distribution of hot springs in kii peninsula and its vicinity, temperature of which are more than 30°C.

3. Origin of Heat of Hot Springs discussed from the Geographical Distribution of Hot Springs in Japan

By Takaharu FUKUTOMI

(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

Heat source of a hot spring is, in general, believed to be a magma or its solidified igneous rock of high temperature which is submerged in the upper part of the earth crust, but different discussions have been presented on the geologic epoch when the magma intrusions which are the heat source of hot springs at present had occurred.

This problem was chiefly discussed in this paper in points of view of density of geographical distribution of hot spring localities in Japan and of their geological characteristics, and the following conclusions were obtained:

1) Heat of hot springs for about 86% of the total numbers of hot spring localities in Japan is considered to be generated from Quaternary igneous rocks and that for about 3% of those is supposed to be originated from Neogene igneous rocks, especially from igneous masses in the later stage of Pliocene.

2) Heat of hot springs for about 10% of the total numbers of hot spring localities in Japan depends perhaps upon the underground heat in the normal place having normal underground temperature gradient. It is theoretically concluded that formation of a hot spring, of which temperature is in the extent from 50°C to 100°C and of which discharge rate is less than about 1000 L/min, is possible, if the normal groundwater be able to flow into the maximum depth of 3~6 km through a fissure of large dimension in rocks. Existence of such a large fissure of deep bottom may be possible in Japan, where the crustal movement and the seismicity is very active.