

日本の温泉放熱量分布と第四紀火山分布との関係 —日本における温泉放熱量分布と地質構造区との関係, 第3報—

角 清愛*

SUMI, K. (1980) Relationship between the distributions of the Quaternary volcanoes and the rate of heat discharge by hot water in Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 31 (6), p.255-266.

Abstract: Rates of heat discharge by hot water and those per unit area of Quaternary volcanic (I) and non-Quaternary volcanic (II) areas are calculated in order to get the basic data on the role of Quaternary volcanoes to the generation of hydrothermal system as its heat source. The Quaternary volcanic area is defined as the area of less than twenty kilometers far from the eruption centers of Quaternary volcanoes.

Rates of heat discharge by hot water per unit area having the temperature higher than 60°C in area I is about nine times as much as in area II. However, the higher concentration of high temperature hot springs at area I also depends on its basemental structure which is favourable to sufficient supplies of water due to Neogene volcano-tectonic depression structure as reported formerly (SUMI, 1977 a, b). Considering those two causes i.e. Quaternary volcanoes as heat source and Neogene volcano-tectonic depression structure as an aquifer basin, the underground heat concentration in area I is five times as much as that in area II.

要 旨

日本の温泉に対して、第四紀火山が熱源として果す役割を見積るために、第四紀火山と温泉放熱量との分布上の相関性を研究した。60°C以上の高温泉放熱量についていえば、第四紀火山地域には日本全体の79%が分布し、単位面積当りの放熱量分布密度は非第四紀火山地域の9倍となっている。しかし第四紀火山地域への高温泉集中には新第三紀の火山性陥没構造に由来する集水構造も大きく貢献しており、第四紀火山が分布していることだけによる熱源への直接の貢献度は分布しない場合の約5倍と見積られる。一方新第三紀の火山性陥没構造に由来する集水構造の貢献度は基盤岩分布地域のそれと比較して約2倍と見積られる。

1. 緒 言

日本における温泉放熱量分布と地質構造区との関係について、これまで筆者はまず第1次区分として日本列島を10⁴ km² オーダーの8構造区に区分しさらに各構造区ごとに水温上5段階に分けて、合計40の部分について論じた(角, 1977 a)。続いて第2次区分として10³ km² オーダーの構造との関係を論ずる第1歩としてグリーンタ

フ地域を基盤岩分布地域と基盤岩非分布地域とに分けて両者の関係を論じた(角, 1977 b)。これら2つの報文において明らかになったことは、地表の温泉徴候の温度として60°C以上が現われるような熱水対流系の生成にはアルプス造山帯の火山帯(Av帯、いわゆるグリーンタフ地域)が最も適しているということであり、この理由としては十分な、しかしバランスのとれた熱と水との供給にあらうと考察した。

今回は10³ km² オーダーの考察の一つとして第四紀火山分布と温泉放熱量との関係を論ずることとしたい。その目的は熱源としての第四紀火山の貢献度を知ることであり、ひいてはそれによって地熱探査地域の選定を容易ならしめようとするものである。

2. 計算の経過

第四紀火山とは一色ほか(1968)にリストアップされている196の火山を指すものとした。そして第四紀火山地域とは各火山の中心から半径20 kmの円(面積10^{3.1} km²)を画いたその内側とした。20 kmとした根拠は、角(1977a, p. 293)にも述べたように従来の諸研究で“火山に関連する”という概念がほぼ20 kmとされているからである。このようにして得られた第四紀火山地域とそれ以外の非第四紀火山地域とをそれぞれI及びII帯とし

* 地 質 部



第1図 日本の第四紀火山地域 (I) 及び非第四紀火山地域 (II) の分布。
打点部が I 帯, その他の地域が II 帯, 破線は後新第三紀構造区界 (角, 1977 a 参照).
Distribution of Quaternary volcanic (dotted) and non-Quaternary volcanic (white)
areas in Japan.

第1表 第四紀火山地域 (I) における構造区別温泉放熱量
Heat discharge by hot water of eight tectonic provinces and two subprovinces in Quaternary volcanic (I) area in Japan.

(unit: 10^6 J/min)

Tectonic province	Water temperature ($^{\circ}$ C)					Total
	<25	≥ 25 —<42	≥ 42 —<60	≥ 60 —<90	≥ 90	
VPH-1	42	197	523	0	0	762
VPH-2	318	343	2,420	1,574	18,292	22,947
Av-1	105	3,491	22,659	35,497	12,169	73,921
(Av-1- α)	(0)	(272)	(863)	(4,060)	(1,436)	(6,631)
(Av-1- β)	(105)	(3,219)	(21,796)	(31,437)	(10,733)	(67,290)
Av-2	80	410	10,699	11,018	17,970	40,177
Av-3	46	88	716	368	0	1,218
Av-4	96	980	13,868	8,757	34,572	58,273
Af-1	80	1,193	1,813	954	0	4,040
Af-2	0	0	0	0	0	0
Total	767	6,702	52,698	58,168	83,003	201,338

第2表 非第四紀火山地域 (II) における構造区別温泉放熱量
Heat discharge by hot water of eight tectonic provinces and two subprovinces in non-Quaternary volcanic (II) area in Japan.

(unit: 10^6 J/min)

Tectonic province	Water temperature ($^{\circ}$ C)					Total
	<25	≥ 25 —<42	≥ 42 —<60	≥ 60 —<90	≥ 90	
VPH-1	707	1,842	71,304	0	0	73,853
VPH-2	1,942	4,228	4,605	8,690	1,210	20,675
Av-1	201	2,026	18,464	14,266	5,354	40,311
(Av-1- α)	(54)	(356)	(620)	(0)	(8)	(1,038)
(Av-1- β)	(151)	(1,670)	(17,845)	(14,266)	(5,346)	(39,278)
Av-2	0	0	0	0	0	0
Av-3	176	431	1,314	2,428	1,160	5,509
Av-4	59	1,704	6,773	3,805	0	12,341
Af-1	205	477	1,356	833	84	2,955
Af-2	4	313	0	0	0	317
Total	3,294	11,021	103,816	30,022	7,808	155,961

第3表 第四紀火山地域 (I) 構造区別, 単位面積あたり温泉放熱量
Heat discharge by hot water per unit area of eight tectonic provinces and two subprovinces in Quaternary volcanic (I) area in Japan.

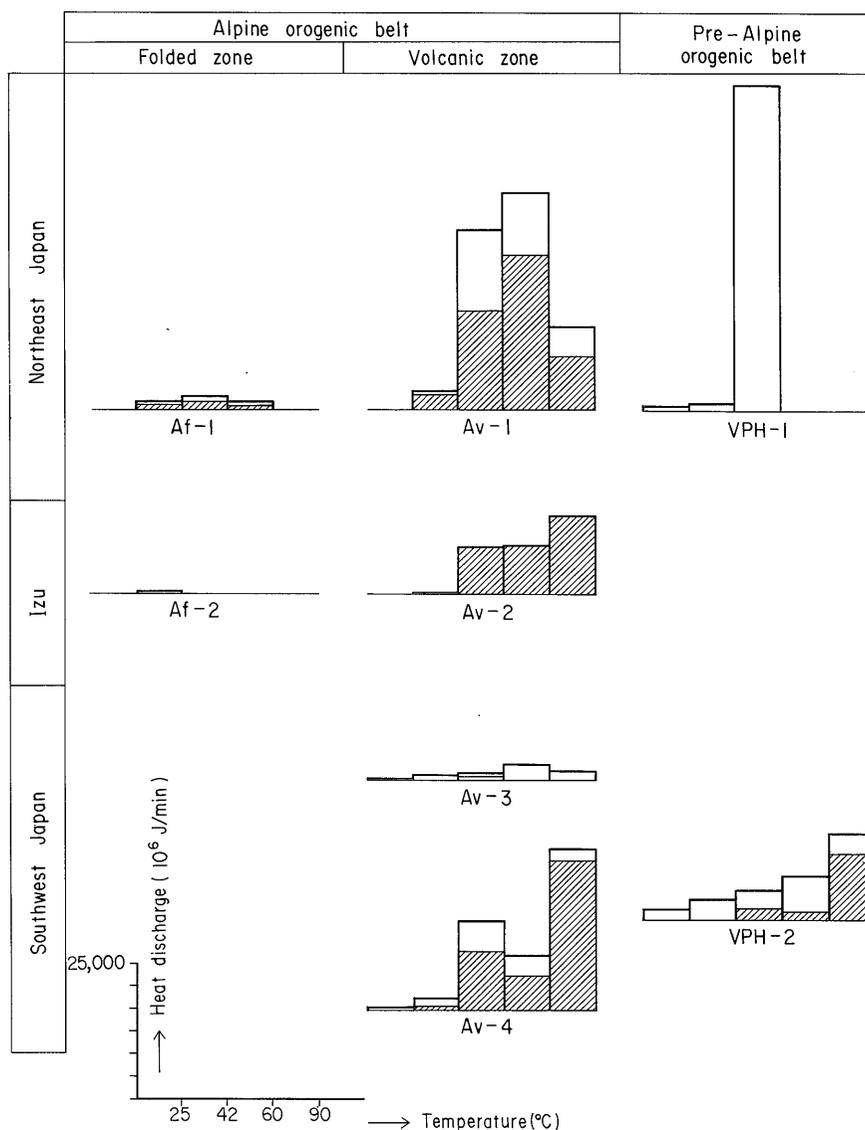
(unit: mW/m²)

Tectonic province	Area (10 ⁹ m ²)	Water temperature (°C)					Total
		<25	≥25—<42	≥42—<60	≥60—<90	≥90	
VPH-1	8.3	0.08	0.39	1.05	0	0	1.52
VPH-2	19.3	0.28	0.30	2.09	1.36	15.8	19.83
Av-1	57.7	0.03	1.01	6.55	10.25	3.52	21.36
(Av-1-α)	(10.2)	(0)	(0.44)	(1.41)	(6.63)	(2.34)	(10.82)
(Av-1-β)	(47.5)	(0.04)	(1.13)	(7.65)	(11.03)	(3.77)	(23.62)
Av-2	2.6	0.48	2.60	68.56	70.63	115.36	257.63
Av-3	3.5	0.22	0.42	3.41	1.75	0	5.80
Av-4	9.5	0.17	1.72	24.33	15.36	60.66	102.24
Af-1	6.4	0.21	3.11	4.72	2.49	0	10.53
Af-2	1.0	0	0	0	0	0	0
Whole Japan	108.3	0.12	1.03	8.10	8.94	12.75	30.94

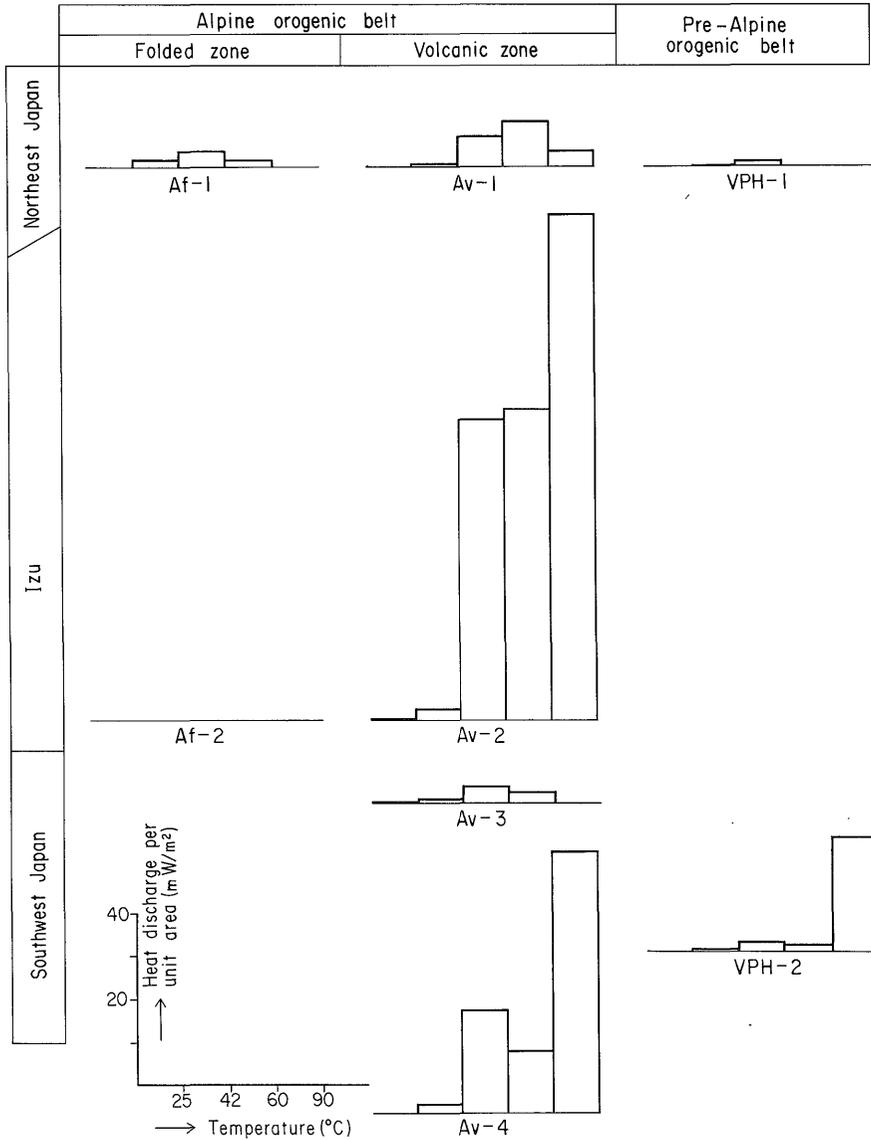
第4表 非第四紀火山地域 (II) 構造区別, 単位面積あたり温泉放熱量
Heat discharge by hot water per unit area of eight tectonic provinces and two subprovinces in non-Quaternary volcanic (II) area in Japan.

(unit: mW/m²)

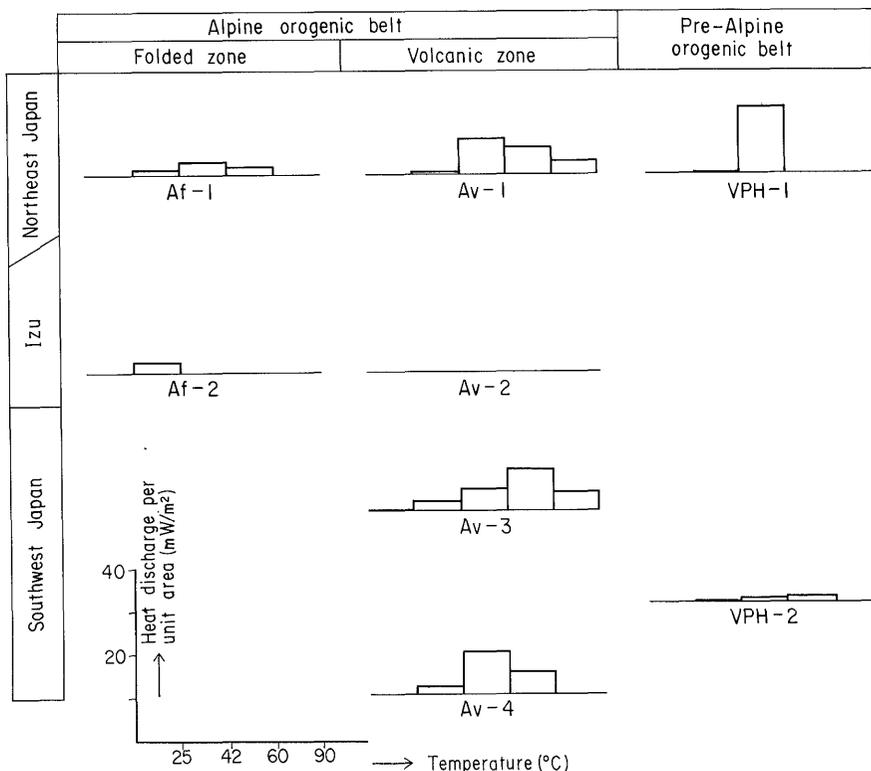
Tectonic province	Area (10 ⁹ m ²)	Water temperature (°C)					Total
		<25	≥25—<42	≥42—<60	≥60—<90	≥90	
VPH-1	78.3	0.15	0.39	15.18	0	0	15.72
VPH-2	119.0	0.27	0.59	0.64	1.22	0.17	2.89
Av-1	37.0	0.09	0.91	8.32	6.43	2.42	18.17
(Av-1-α)	(14.3)	(0.06)	(0.41)	(0.73)	(0)	(0)	1.20
(Av-1-β)	(22.7)	(0.11)	(1.23)	(13.10)	(10.47)	(3.92)	28.83
Av-2	0	—	—	—	—	—	—
Av-3	4.3	0.68	1.68	5.09	9.41	4.50	21.36
Av-4	11.6	0.08	2.45	9.73	5.47	0	17.73
Af-1	9.5	0.36	0.84	2.38	1.46	0.15	5.19
Af-2	2.0	0.03	2.62	0	0	0	2.65
Whole Japan	261.7	0.21	0.70	6.62	1.91	0.50	9.94



第2図 日本における温泉放熱量の構造別・温度別ヒストグラム。
 ハッチ部は第四紀火山地域 (I), 白色部は非第四紀火山地域 (II)
 Histogram of convective heat discharge in sixteen tectonic provinces.
 White: non-Quaternary volcanic area.
 Grey : Quaternary volcanic area.



第 3 図 第四紀火山地域 (I) の単位面積あたりの温泉放熱量の構造別・温度別ヒストグラム
Histogram of convective heat discharge per unit area of eight tectonic provinces in Quaternary volcanic area.



第4図 非第四紀火山地域(Ⅱ)の単位面積あたりの温泉放熱量の構造区別・温度別ヒストグラム
Histogram of convective heat discharge per unit area of eight tectonic provinces in non-Quaternary volcanic area.

た(第1図)。

温泉放熱量の計算は前報と同様の方法で、Ⅰ及びⅡ帯について、それぞれ8構造区及び2構造亜区(VPH-1, VPH-2, Av-1, Av-1- α , Av-1- β , Av-2, Av-3, Av-4, Af-1及びAf-2)及び5温度区分(<25, ≥ 25 -<42, ≥ 60 -<90及び $\geq 90^\circ\text{C}$)について、都合 $2 \times 10 \times 5 = 100$ の温泉放熱量値を計算した。その結果を第1表及び第2表に示す。次にこの100の数値を面積で除して単位面積あたりの温泉放熱量値を求めた。これを第3表及び第4表に示す。第1-第4表の値を前報と同様にヒストグラムに表現したのが第2-第4図である。さらに温度帯別放熱量図を作製して第5図及び第6図に示す。

3. 結果の考察

上記の計算の結果次のことが考察される。

3.1 60°C以上の高温泉の温泉放熱量

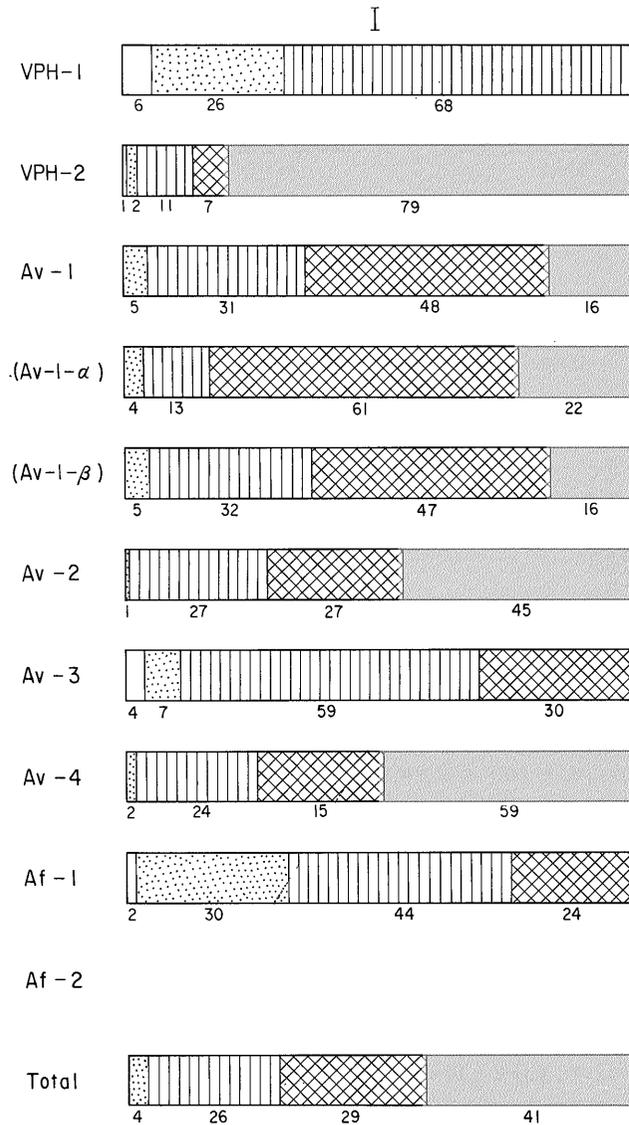
地熱開発地となり得る可能性の高い60°C以上の温泉の湧出地の地質構造の見当をつけるために、Ⅰ及びⅡ帯それぞれについて、VPH, Av及びAf帯の地質構造区別

に60°C以上の温泉放熱量を集計すると第7図のようになる。これによれば発電用に関係の深い地熱資源はその79%が、熱源的に第四紀火山と関係がある可能性を持ち、残りの21%は第四紀火山との関係は特に認めることは出来ない。後者については潜頭性の第四紀火山又は第三紀とくに鮮新世の火山との関連を考慮する必要がある。福富(1970)は第四紀火山と関係する温泉として86%という数字をあげている。これは30°C以上のものについて考えたもので、今回の温泉放熱量の方からのこれに相当する数字は56%とかなり低い数字となっている。

Ⅰ帯とⅡ帯との単位面積あたり温泉放熱量の比は全体で3:1, 60°C以上で9:1, 90°C以上で26:1と高温になるにつれてⅠ帯の比率が急激に増大して来る。このことは基本的には第四紀火山の熱源が浅く、高温であることを示しているのであろう。

3.2 60°C以上の温泉放熱量における第四紀火山分布及びグリーンタフ地域の地質構造の貢献度の割合

60°C以上の温泉放熱量は上述のように第四紀火山地域(Ⅰ帯)において著しく高く、また一方前報(角, 1977a,



第5図 第四紀火山地域 (I) における温度帯別温泉放熱量
 Percentages of convective heat discharges of five
 temperature ranges of eight tectonic provinces and
 two subprovinces in Quaternary volcanic area.

b) のようにグリーンタフ地域 (Av 帯) においても著しく高い。これはこれら二つの帯がそれぞれ熱源分布あるいは集水構造の上から熱水対流系生成に好ましい条件であることによると思われる。このため第四紀火山地域であり、かつグリーンタフ地域である地域 (I-Av 帯) の 60°C 以上の温泉放熱量が日本全体の 67% にもなるのである。

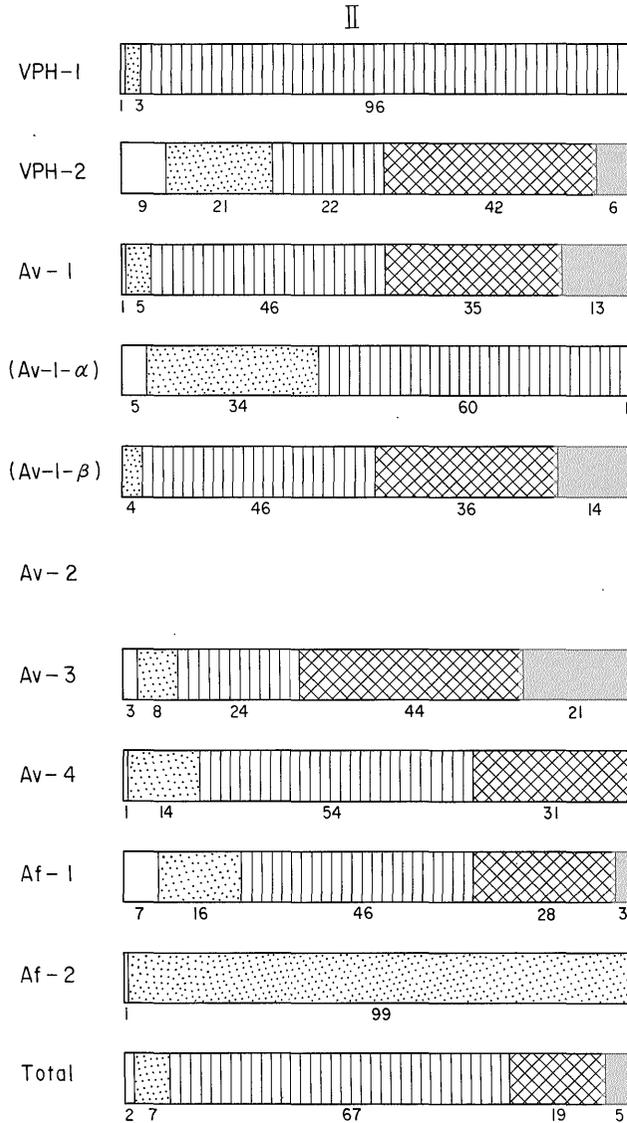
以下、温泉放熱量分布について上述の熱分布と水分布との二つの要因がどの程度の割合で貢献しているか考察してみよう。

このような考察には単位面積あたりの温泉放熱量値が最も適していると思われるので、60°C 以上についてのその値を主要構造区について求め第5表のようなマトリックスを得た。この表には同時に加重平均も求めてある。

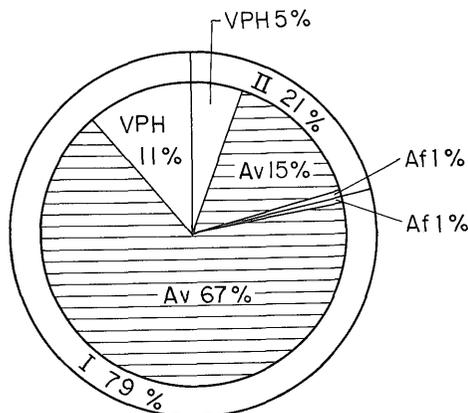
考察はこの表から出発するのであるが、話を簡単にするために Af 帯は全放熱量の 2% を占めるに過ぎない (第 7 図) という理由で割愛し VPH 及び Av 両帯について考えることとする。

まず、“第四紀火山に由来する”及び“第四紀火山以外に由来する (たとえば潜在第四紀火山, 第三紀火山など)” 60°C 以上の温泉水の熱量がそれぞれ H_1 及び H_2 J/

g で, “新第三紀構造盆からの”及び“先新第三紀基盤岩からの” 単位面積あたりの 60°C 以上の温泉水流出量がそれぞれ M_1 及び M_2 g/sec·m² であるようなモデルを考えると, I 帯及び II 帯の 60°C 以上の温泉水の熱量はそれぞれ $H_1 + H_2$ 及び H_2 J/g, Av 帯及び VPH 帯の単位面積あたりの 60°C 以上の温泉水流出量はそれぞれ $M_1 + M_2$ 及び M_2 g/sec·m² となる。



第 6 図 非第四紀火山地域 (II) における温度帯別温泉放熱量
Percentages of convective heat discharges of five temperature ranges of eight tectonic provinces and two sub-provinces in non-Quaternary volcanic area.



第7図 60°C以上の温泉放熱量の構造区別百分率
Approximate percentages of convective heat discharge in six major tectonic province.

第5表 主要構造区の単位面積あたりの60°C以上の温泉放熱量
Heat discharge by hot water having the temperature equal to or higher than 60°C per unit area of main tectonic provinces
(unit: mW/m²)

	I	II	Mw
Av	27.4	8.5	19.5
Af	2.5	1.6	
VPH	17.2	1.4	2.2
Mw	21.7	2.4	16.1

Mw:加重平均

よって第5表の単位面積あたりの60°C以上の温泉放熱量 Q W/m² は次のように表わされる。

	I 帯	II 帯
Av 帯	$(H_1+H_2)(M_1+M_2)$	$H_2(M_1+M_2)$
VPH 帯	$(H_1+H_2)M_2$	H_2M_2

.....(1)

このようなモデルにおいては

$$\frac{Q_{I-Av}}{Q_{I-VPH}} = \frac{(H_1+H_2)(M_1+M_2)}{(H_1+H_2)M_2} = \frac{H_2(M_1+M_2)}{H_2M_2}$$

$$= \frac{Q_{II-Av}}{Q_{II-VPH}}$$

$$\frac{Q_{I-Av}}{Q_{II-Av}} = \frac{(H_1+H_2)(M_1+M_2)}{H_2(M_1+M_2)} = \frac{(H_1+H_2)M_2}{H_2M_2}$$

$$= \frac{Q_{I-VPH}}{Q_{II-VPH}}$$

の関係が成立するから、第5表の数値(実測値)をこの

モデルに適合した理論値に補正することとする。

この場合第5表の実測値から上記2つの比を求めるに際して(A)加重平均から求める方法と(B)幾何平均とから求める方法とがある。この両者の方法の得失を考えてみると、(A)では重みとして面積をとっているの、総放熱量の場合は意味があるが、今のような単位面積あたりの放熱量を論ずる場合は、かえってこの“単位面積あたり”の意味を薄めることになる。例えば熱源問題についての加重平均はII帯がI帯の2.4倍の面積を持つというだけの理由でII帯の比の影響が強く出ることになる。

一方幾何平均は地域的な特殊性が誇張されすぎるきらいがある。面積が狭くて異常な放熱量を示す地域が、面積が広くて正常な放熱量を示す地域と対等に取扱われることになる。しかし、この場合、単位面積あたりの値を問題にすることと、誇張したい要素をもとに地域区分がなされていることのためにその欠点が救われることとなる。このような理由から幾何平均の方がベターであることとなる。

幾何平均 (Mg) は次のようになる。

	I	II	Mg
Av	27.4	8.5	15.3
VPH	17.2	1.4	4.9
Mg	21.7	3.4	8.6

したがって、理論値は

$$\frac{Q_{Av}}{Q_{VPH}} = \frac{15.3}{4.9} = 3.1$$

$$\frac{Q_I}{Q_{II}} = \frac{21.7}{3.4} = 6.4$$

でなければならず、今 $Q_{II-VPH} = q$ とおけば第5表に相当する理論値は次のようになる。

	I 帯	II 帯
Av 帯	19.8q	3.1q
VPH 帯	6.4q	q

.....(2)

(1)及び(2)のマトリックスから

$$(H_1+H_2)(M_1+M_2) = 19.8q$$

$$(H_1+H_2)M_2 = 6.4q$$

$$H_2(M_1+M_2) = 3.1q$$

$$H_2M_2 = q$$

が導かれ、よって次の関係が得られる。

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{19.8-3.1}{3.1} = 5.39 \div 5$$

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{19.8-6.4}{6.4} = 2.09 \approx 2$$

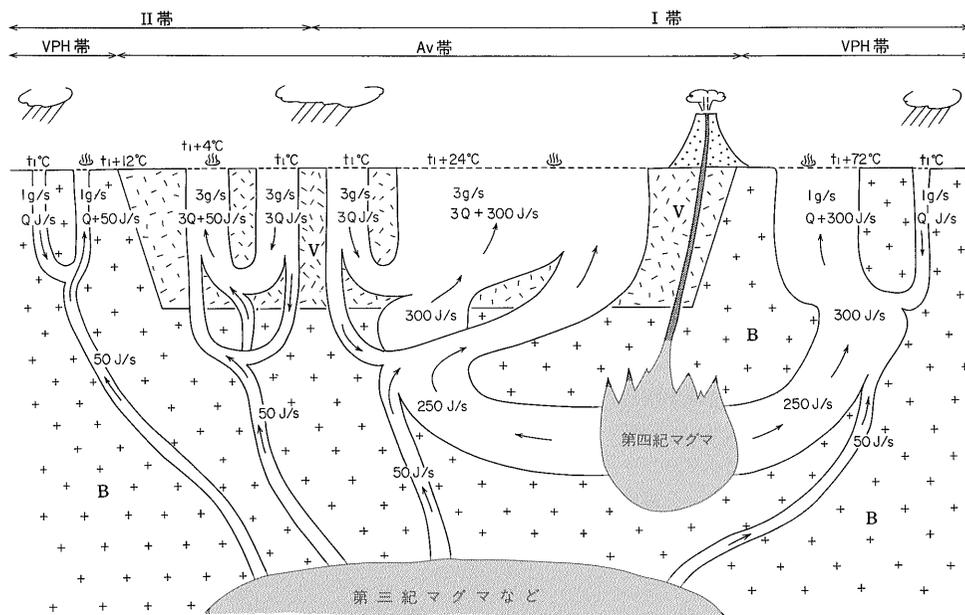
換言すれば第四紀火山は熱源として他種のものの5倍、新第三紀構造盆は集水構造として、他種のものの2倍の貢献度を持つといえよう。

3.3 温度帯別温泉放熱量

熱及び水の供給について前節のような考え方が成り立つとすれば、I-VPH帯は水に対する熱の供給率が、I-Av帯よりも高いから、高温帯の放熱量の百分率が相対的に高くならなければならない。一方、II-Av帯は逆に低温帯の放熱量百分率が相対的に高くなるはずである。第5図及び第6図に示したI及びII帯、それぞれの8帯の温度帯別温泉放熱量図をみてみよう。

I-VPH帯の高温泉卓越傾向はI-VPH-2及びこれに準ずるI-Av-1-αにおいて、典型的にみることが出来る。このことは前報(角, 1977, a, b.)でも予測考察した通りである。即ちI-Av-1帯に比較してI-VPH-2帯では、60°C以上で64→86% (1.3倍)、90°C以上では、16→79% (4.9倍)と増大する。またI-Av-1-α帯では、60°C以上で64→83% (1.3倍)、90°C以上で16→22% (1.4倍)と増大する。

一方II-Av帯の低温泉卓越傾向はどうであろうか。II-Av-1帯をI-Av-1帯に比較してみると、60°C以上について64→48% (1/1.3倍)、90°C以上について16→13% (1/1.2倍)、またII-Av-4帯をI-Av-4帯に比較してみると、60°C以上について74→31% (1/2.4倍)、90°C以上について59→0%とおおむね減少傾向を示している。しかしAv-3帯に関してのみは60°C以上については30→65% (2.2倍)、90°C以上に関しては0→21%と逆に増加するという顕著な例外を示している。つまりI帯で、Av-3帯のみが高温泉が非常に少なく(Af帯並み)、一方II帯ではAv-3帯のみが高温泉が多い(I-Av-1帯並み)のである。このことからAv-3帯は他地区と異なった熱・水供給メカニズムがあるのではないかということ疑わせる。つまり熱源に関しては第四紀火山が、小さい、深いあるいは古い等の原因、一方第三紀火山は逆に大きい、浅い、新しい等の原因が考えられるし、水供給に関しては第三紀火山岩類の層厚が薄いために冷却効果が小さく基本的にはVPH帯的になっている等の原因が考えられる。このようなAv-3帯の特殊性は杉山(1963)の温泉の成因に対する花崗岩関連学説を生んだ背景となっているといえよう。



第8図 日本の熱水対流系の熱量・質量収支モデル

t₁: 地表水の温度, V: 新第三紀の多孔質火山岩,
B: 先新第三紀の結晶質岩

Model of the balances of heat and mass transfers in Japanese hydrothermal convection system.

4. 要約及び結論

日本の温泉に対して熱源としての第四紀火山の貢献度を知るために、温泉放熱量分布と第四紀火山分布との関係を研究した。第四紀火山地域 (I 帯) は第四紀火山の噴火中心から半径 20 km の範囲とし、その他の地域を非第四紀火山地域 (II 帯) とした。地質構造区は前報 (角, 1977a, b) の 8 構造区及び 2 構造亜区の 10 区とし、また温度帯を 5 つに分けて、結局 $2 \times (8 + 2) \times 5 = 100$ の温泉放熱量を算出し、それぞれについて単位面積あたりの温泉放熱量を算出した。

この結果日本の温泉放熱量の 56% が I 帯に分布するが、60°C 以上の温泉放熱量は 79%, 90°C 以上は 91% が I 帯に分布する。I 帯の単位面積あたりの温泉放熱量は II 帯のそれに対して、全体で 3 倍、60°C 以上で 9 倍、90°C 以上で 26 倍となる。

I 帯への高温泉集中は前報に述べた良好な集水構造 (アルプス造山帯の火山地域, Av 帯) も大きく貢献している。そこで熱源及び集水構造の 2 素因の貢献度を、60°C 以上の温泉について概略按分すると I 帯は II 帯の約 5 倍の熱集中があり、Av 帯はその他の地域の約 2 倍の水分布密度があると推定される。この結果古期基盤岩上に第四紀火山が分布するような地域では冷却効果の弱いことに原因するとみられる高温泉の極端な集中が起っている。

このようなモデルを簡単に図化したものが第 8 図である。図では質量流と熱量流とが同じ表現となっているので注意していただきたい。

5. 今後の問題

以上日本の温泉に対する熱源としての第四紀火山の貢献度を温泉放熱量分布の面から概括的に考察した。この議論は前から繰返して述べているように新第三紀火山岩類はその大部分がグリーンタフであるから、その特徴的な陥没構造から、温泉の成因に対して集水構造としての役割を持つとする大胆なモデルに基づいている。しかし杉山 (1963) の論説にもあるようにグリーンタフをもたらした火成活動が熱源になり得ないという確証はない。現

に本論で述べたように第四紀火山の 1/5 程度の可能性はあるのである。特に第四紀への漸移的段階の鮮新世火山についてはその可能性が大きく、さらに研究が必要であろう。この研究では同様な沈降帯でありながら、構成内容の異なる新第三紀褶曲地帯の Af 帯については言及しなかったが VPH 帯と Af 帯について本文と同様な考察を行うと

$$\frac{H_1}{H_2} \doteq 4$$

$$\frac{M_1}{M_2} \doteq 2$$

という結果がでる。つまり、熱源に対しては I 帯は II 帯の約 4 倍となるが、水量に関しては VPH 帯が Af 帯の 2 倍と逆に VPH 帯の方が大きい値となる。水量に関して Af 帯と Av 帯への間にこのような差異が出るのは、水量は単なる孔隙率でなく浸透率の違いを示すためかもしれない。さらにきめ細かい研究が必要である。

(謝辞) 本研究において、データの処理・解釈の点について地殻熱部花岡尚之技官の御助言をいただいた。ここに感謝の意を表する。

文 献

- 福富孝治 (1970) 本邦の温泉分布からみた温泉の熱の起源。北大地物研報, no. 23, p. 15-28.
- 一色直記・松井和典・小野晃司 (1968) 日本の火山。1 : 2,000,000 地質編集図, no. 11, 地質調査所。
- 杉山隆二 (1963) 山陰の温泉の地質。温泉工学会誌, vol. 1, p. 42-47.
- 角 清愛 (1977a) 日本における温泉放熱量分布と地質構造区との関係。地調月報, vol. 28, p. 277-325.
- (1977b) グリーンタフ地域における基盤岩分布と温泉放熱量分布との関係。地調月報, vol. 28, p. 589-592.

(受付: 1979年11月15日; 受理: 1980年2月27日)