

総説

温泉の熱エネルギーとその起源

北海道大学名誉教授

福 富 孝 治

I. はしがき

近年のオイルショックの後、国内のエネルギー資源について肝心が著しく高まってきた。温泉もエネルギー資源の1つであるが、これは主として熱エネルギーである。1温泉地がどのくらいの熱エネルギーをもち、また本邦全域の温泉からどの程度の熱エネルギーが放出されているかを知ることは大切なことである。本総説は温泉各分野の研究者の参考に供するために、温泉から放出される熱エネルギーとその起源等について概説したものであるから理論式は必要最小限度にとどめた。この問題は、現在のところ、未知の部分が少くないので将来の調査研究にまたなければならぬことを付記する。

II. 1 温泉地域から放出される熱エネルギー

まず、1温泉地域から放出される熱エネルギーについて考えよう。ここで考えている熱エネルギーは問題の温泉地がこれと同じ地理的条件にある普通の土地（温泉水の代りに普通の浅層地下水が存在する地域）と比較して余分に持っている熱エネルギーとする。すなわち、普通の土地から放出される熱エネルギーを零とみなした値である。したがって、1温泉地域から単位時間に放出される熱エネルギー、すなわち熱量 Q は、その地域のすべての温泉から流出する温水（高温の場合には水蒸気を含むこともある）についてその土地の普通地下水の温度を基準として測った熱量 Q_1 と、その温泉地域の地表から空気中へ放出される熱量から普通の土地の値を差引いた値 Q_2 との和である。

温度があまり高くない温泉地については、 Q_1 の値を求めることは比較的容易であるが、次のような問題がある。すなわち、近年温泉の水圧低下に伴い自噴井が減少し多くの温泉地で動力揚湯が行なわれるようになったが、その揚湯時間がまちまちでその正確な揚湯量を求めることがむづかしくなった。 Q_2 の値については、熱伝導によって地中から空気中に放出される熱量が、地下で 100°C を越えるような高温な地域を除けば、主要なものであるので、温泉地域の表土層の地面に垂直方向の温度傾斜と土の熱伝導率を測定すれば求められるが、1温泉地域では温度傾斜と1m深地温との間に直線的関係があるので、1温泉地域の多くの地点で測定の比較的容易な1m深地温を測定して Q_2 を求めることができる。

温度の高い沸騰泉地域（地熱地帯）における Q_1 の測定は上記の場合に比較して複雑である。熱水と水蒸気との混合状態で流出する温泉については、その温度と湧出量の他に熱水と水蒸気との混合の割合を知るか、地下やや深くで熱水と水蒸気が分離する以前の液状温泉水の温度と湧出量とを知ることが必要である。また、水蒸気だけが噴出する噴気孔においては、その温度の他に蒸

気量を特別な装置を用いて測定しなければならない。高温温泉の湧出口は、しばしば池状をなしていることがあり、このような場合には水面から蒸発による熱の損失も大きいから、その測定¹⁾も行なう必要がある。また、沸騰泉地域では地温の分布も複雑であるから Q_2 の測定には少量の降雪による融雪を利用する方法²⁾などが用いられている。

第1表は筆者ら³⁾が北海道の18の主要温泉地と16の小温泉地について行なった調査の結果であ

第1表 北海道の温泉地域における熱エネルギーの測定値(単位: 10^7 cal/min)

No.	温泉地域	Q_1	Q_2	Q	Q_2/Q	n	$T_m(^{\circ}C)$	V_m (l/min)	熱階級	面積 (10^{-2} km ²)	平均熱流量 ($\times 10^{-6}$ cal/cm ² sec)
1	湯沼地域(登別)	84	—	(116)	—	—	>120	6040	VI	—	—
2	地獄谷(登別)	49	18	67	0.27	多数	>150	4350	V	11	2780
	" "	31	9	40	0.23	"	"	3740	V	11	1390
3	定山溪	58	2	60	0.03	50	89	9300	V	55	60
4	川湯	37	17	53	0.32	50	>120	8360	V	235	119
5	アトサヌプリ	35	12	47	0.26	56	119	780	V	90	220
6	湯本湯沼(ニセコ)	27	1	28	0.04	—	>120	330	IV	6	273
7	湯の川	22	2	24	0.09	37	66	3980	IV	50	71
8	濁川	4.7	14	18	0.74	37	97	620	IV	362	63
9	ユコマンベツ	12	—	(17)	—	18	53	2510	IV	—	—
10	洞爺湖畔	12	1.1	13	0.08	20	55	3140	IV	104	18
11	層雲峡	8.6	2.8	11	0.25	32	94	1300	IV	81	57
12	鹿部	7.9	0.9	8.8	0.11	24	114	980	III	—	—
13	十勝川	5.8	—	(8.1)	—	8	50	1880	III	48	10
14	弟子屈	3.9	0.27	6.6	0.41	30	98	770	III	20	320
15	糠平	2.8	4.0	6.8	0.53	28	65	600	III	—	—
16	ニセコ	3.4	—	(4.8)	—	6	87	500	III	52	109
17	阿寒湖畔	1.4	3.4	4.8	0.71	26	100	250	III	293	10
18	温根湯	1.4	1.7	3.1	0.55	15	55	350	III	28	55
19	谷地頭	2.2	0.4	2.6	0.15	5	69	490	II	13	51
20	昆布	1.8	0.3	2.1	0.14	8	56	380	II	—	—
21	天人峡	1.7	—	(2.4)	—	8	51	430	II	—	—
22	新見	1.8	—	(1.8)	—	2	66	250	II	—	—
23	カルルス	0.84	0.15	1.0 + α	0.15	6	56	170	II	4	60
24	ばんけい	1.1	—	(1.6)	—	5	76	250	II	—	—
25	仁伏	1.0	—	(1.4)	—	8	46	290	II	—	—
26	べんけい	0.90	—	(1.3)	—	3	66	160	II	—	—
27	雄阿寒	> 0.82	—	(1.1)	—	9	76	> 200	II	—	—
28	当別	0.75	0.44	1.2	0.37	6	70	220	II	9	81
29	昆布川	0.83	—	(1.0)	—	2	43	250	I	—	—
30	塩別	0.78	—	(1.0)	—	3	42	250	I	—	—
31	成田	0.61	—	(0.8)	—	3	43	210	I	—	—
32	シケレベツ	0.55	—	(0.8)	—	6	41	200	I	—	—
33	山田	0.44	—	(0.6)	—	1	44	130	I	—	—
34	黄金湯	0.06	—	(0.1)	—	1	31	30	0	—	—

平均 $Q_2/Q = 0.29$

る。表には温泉地を総熱量 Q の大きい順に配列し、その各々に対し、 10^7 cal/min 単位の Q_1 , Q_2 , Q の値, Q_2/Q , 湧出口数, 地下最高温度または湧出温度, $30^{\circ}C$ 以上の温泉の総湧出量, 後に述べる温泉熱階級, 温泉地域面積の概値, Q を温泉地域の単位面積, 単位時間に直したある意味の平

均熱流量の値を示した。

その結果を要約すれば次の様である。

- (1) 北海道の各温泉地域から放出される熱エネルギーは 10^7 cal/minの単位で0.1~130の値である。
- (2) 1温泉地域の地表から空气中に放出される熱エネルギー Q_2 はその地域から出る総熱エネルギーの平均30%ぐらいであるが、自然湧出の状態に近い温泉地はその値が大きく、深い削井から動力揚湯をしているような温泉地ではその値が小さい傾向がある。
- (3) Q の大きい地域は Q の小さい地域と比較して地下温泉温度が高い傾向があるが、それにも増して湧出量が多い。

第2表には北海道を除いた本邦、および外国における熱エネルギーの大きい温泉地域または地熱地帯の例を掲げた。すなわち、1温泉地域から放出される温泉の熱エネルギーは 10^7 cal/minの単位で0.1から1600ぐらいの範囲内の値を示すことが判る。

第2表 熱階級V以上の温泉地域または地熱地域の例

温泉または地熱地域	放熱量 Q (単位 10^7 cal/min)	熱階級	文 献(備考)
大湧谷早雲山地域(神奈川)	64	V	湯原(1968) ⁴⁾
玉川温泉(秋田)	90	V	(自然湧出), 松尾他 ⁵⁾
熱海温泉(静岡)	132	VI	⁵⁾
松川地熱発電所(岩手)	約 200	VI	(蒸気井を含む) ⁵⁾
マンモス・ホットリバー地域	200	VI	D. E. White(1957) ⁶⁾
別府(大分)	224	VI	湯原 ⁷⁾ (1964), 佐藤他(1963)
大岳地熱発電所(大分)	268	VI	(蒸気井, 温泉井を含む) ⁵⁾
小浜(長崎)	361	VII	渡辺 ⁸⁾ (1958)
アッパー・ガイサーベースン(U.S.A)	540	VII	D. E. White(1957) ⁶⁾
ワイラケイ(ニュージーランド)	660	VII	" (") ⁶⁾
" (")	858	VII	Benseman(1959) ⁹⁾
ワイオタブ(")	1630	VII	" (")

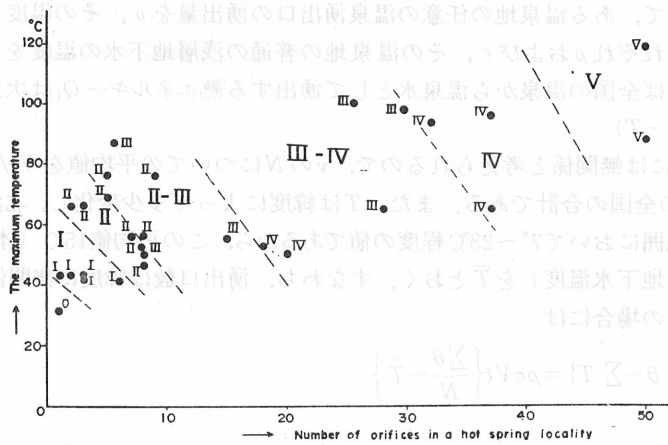
III. 北海道全域の温泉から放出される熱エネルギーの概値

次に北海道の全温泉地から放出される熱エネルギーの概値を求めてみよう。北海道にはおよそ90の温泉地がある。比較的規模の大きい所についてはほとんど調査を行なったが、まだ総数の%の小規模な温泉地が未調査である。これらの値を推定するために、**第3表**に示した“温泉の熱階級”を考え、ある温泉地をその Q の値によって0, I, II, ……VIIの8階級の1つとして表わすことにした。

第3表 温泉の熱階級

熱エネルギー(単位cal/min)	熱階級
$0.32 \times 10^7 (10^{6.5})$ 以下	0
$0.32 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^7 (10^7)$	I
$1.0 \times 10^7 \sim 3.2 \times 10^7 (7.5)$	II
$3.2 \times 10^7 \sim 10 \times 10^7 (10^8)$	III
$10 \times 10^7 \sim 31.6 \times 10^7 (10^{8.5})$	IV
$31.6 \times 10^7 \sim 100 \times 10^7 (10^9)$	V
$100 \times 10^7 \sim 316 \times 10^7 (10^{9.5})$	VI
$316 \times 10^7 \sim 1000 \times 10^7 (10^{10})$	VII

未調査の温泉地の場合にも、温泉湧出口の総数とか地下最高温度とかいう量が判っている場合が少なくないので、このような場合には、調査済みの温泉地におけるこれらの関係、例えば**第1図**の関係を利用すれば、その温泉地の熱階級が判ることが多い。



第1図 1 温泉地域の最高温度、温泉数と温泉の熱階級との比較

しかも、1、2度その温泉地に行ったことがあって温泉の状況を見たことがあれば、これらの温泉活動を調査ずみの各温泉地の活動と比較することによって、概略その熱階級を推察することは可能である。これは丁度地震を身体で感じて震度階を知るのと同様である。筆者はこのような方法で北海道におけるほとんどすべての未調査温泉地の熱階級を推定した。これらを調査済の温泉地と併せて、熱階級別の数と熱エネルギーの合計を示したのが第4表である。表から判るように、

第4表 北海道の全温泉地域における熱階級別の温泉地数と熱エネルギー

熱階級	温泉地数 (その百分率)	熱エネルギーの計 (単位 10^7 cal/min)
VI	1(1.2)	116
V	5(5.7)	252
IV	8(9.2)	153
III	8(9.2)	49
II	16(18.4)	29
I	42(48.3)	27
0	7(8.0)	1
	計87(100)	6.5×10^9 cal/min

温泉地総数の半数以上は熱階級 I 以下すなわち熱エネルギーが 10^7 cal/min 以下の温泉地であることは注意すべきである。

調査済の温泉地については求められた値を用い、未調査の温泉地に対してはその熱階級の両端の熱量の平均値を採用して、表に示したように、北海道の全温泉地から放出されている熱エネルギーを計算して

$$Q = 6.5 \times 10^9 \text{ cal/min}$$

という概値を得ている。

IV. 本邦の全温泉地域から放出される熱エネルギーの概値

本邦の全温泉地域から放出される熱エネルギーの値を求めるためには、少くとも全国の主要温泉地において放出される熱エネルギーの測定が必要であり、これには今後数10年の歳月がかかるであろう。しかし、その値の程度だけでも現在推察してみると次のようである。¹⁰⁾

第1の方法として、日本全国の温泉地についても温泉の熱階級別頻度分布(百分率)は北海道の場合(第4表)と全く同様であると仮定し、厚生省国立公園部管理課の発表(昭43.3月)による全国温泉地数1479、北海道温泉地数128を用いると、全国の温泉地から放出される総熱エネルギーQの概値は

$$Q = 6.5 \times 10^9 \text{ cal/min} \times \frac{1479}{128} = 7.5 \times 10^{10} \text{ cal/min} = 1.3 \times 10^9 \text{ cal/sec}$$

と見積られる。

第2の方法として、ある温泉地の任意の温泉湧出口の湧出量を v 、その温度を θ 、温泉水の密度および比熱をそれぞれ ρ および c 、その温泉地の普通の浅層地下水の温度を T 、全国の温泉湧出口数を N とおけば全国の温泉から温泉水として湧出する熱エネルギー Q_1 は次式で与えられる。

$$Q_1 = \rho c \sum v(\theta - T) \tag{1}$$

v は θ または T には無関係と考えられるので、 v の N についての平均値を Vt/N とする。但し、 Vt は温泉湧出量の全国の合計である。また、 T は緯度によって多少変化し、北海道の北端から九州の南端に至る範囲において $7^\circ \sim 23^\circ\text{C}$ 程度の値であるから、この平均値 15°C （本邦の中緯度 38° における地下30mの地下水温度）を \bar{T} とおく。すなわち、湧出口数は緯度に関係なく一様に分布すると仮定する。この場合には

$$Q_1 = \rho c \frac{Vt}{N} \{ \sum \theta - \sum T \} = \rho c Vt \left\{ \frac{\sum \theta}{N} - \bar{T} \right\} \tag{2}$$

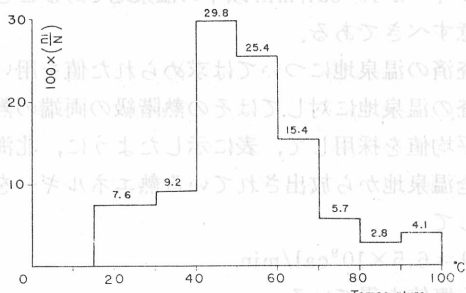
となる。

前記の国立公園部昭和43年3月発表によれば本邦の温泉の総湧出量は $1,207,194\text{L}/\text{min}$ であるが、この値には 25°C より温度の低い鉱泉も含まれている。厚生省国立公園部編日本鉱泉誌によって調べると上記総湧出量の77%が 25°C 以上の温泉湧出量と推定される。また $15^\circ \sim 25^\circ\text{C}$ の微温泉水を $25^\circ \sim 30^\circ\text{C}$ の温泉数の2倍と仮定すれば、 15°C 以上の総湧出量 Vt は 25°C 以上の湧出量の1.054倍と近似的に見積られる。故に

$$Vt = 1.207 \times 10^6 \times 0.77 \times 1.054 \text{L}/\text{min} = 0.97 \times 10^6 \text{L}/\text{min} = 16.2 \times 10^6 \text{cc}/\text{sec}$$

となる。

第2図は上記日本鉱泉誌に記載の温泉について温度を 10° 毎の組に分けて各組の頻度を百分率で表わし、これを縦軸にとり横軸には温度をとって頻度分布を示したものである。この図から計算すると



第2図 本邦温泉の温度の頻度分布(%)

$$\left\{ \frac{\sum \theta}{N} - \bar{T} \right\} = 37.9^\circ\text{C}$$

が得られる。 $\rho c = 1.0$ を採用し、これらの値を(2)式に代入すると

$$Q_1 = 1.0 \times 16.2 \times 10^6 \times 37.9 = 6.1 \times 10^8 \text{cal}/\text{sec}$$

となる。

さて、本邦の全温泉地域から放出される熱エネルギー Q は温泉水（水蒸気を含む）として出るとの Q_1 と温泉地域の地表から空气中に放出される熱 Q_2 の和であるが、北海道の主要温泉地についての調査結果（第1表）によれば Q_2 の値は平均して0.29 Q であることが知られているのでこの関係が全国的にも成立すると仮定すれば

$$Q = Q_1 / 0.71 \tag{3}$$

なる近似的関係がある。故に、 Q_1 の値をこの式に代入して $Q = 0.86 \times 10^9 \text{cal}/\text{sec}$ という結果を得た。

このように、2つの方法によって本邦の全温泉地域から放出される熱エネルギー Q の概値を推定した結果、第1の方法では $1.3 \times 10^9 \text{cal}/\text{sec}$ 、第2の方法では $0.9 \times 10^9 \text{cal}/\text{sec}$ と同程度の値が求められた。これらの平均値を用いることにすれば

$$Q \approx 1.1 \times 10^9 \text{cal}/\text{sec} = 6.6 \times 10^{10} \text{cal}/\text{min} = 3.5 \times 10^{16} \text{cal}/\text{yr}$$

である。この熱エネルギーの程度を理解するために、燃焼熱 $7000 \text{cal}/\text{g}$ の石炭量に直してみると

1年間に500万吨の石炭の燃焼する熱に当たり、器械エネルギーに換算すれば 1.5×10^{24} erg/yr となり、もし熱が仕事をするときの工率を10%とすれば、例えば1948年に発生した福井地震（マグニチュード7.2、エネルギー 4×10^{22} ergs）を毎年約4回ひき起す程度の熱エネルギーに当るのである。

温泉など特異な地点を除いた普通の土地（海底を含む）において、地球内部から熱伝導で空気（海底の場合は海水）中に放出される熱流量 H の値は平均して $1.2 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-6}$ cal/cm²-sec であることが知られているが、本邦陸地全域に直すと $4.3 \times 10^9 \sim 5.4 \times 10^9$ cal/sec であり、温泉による総熱エネルギーの値 Q をこの値と比較すると

$$Q/H \approx 0.30 \sim 0.20$$

となる。

ここで述べた本邦の全温泉地域から放出される熱エネルギー Q の概値には活動的火山の山頂付近の噴気孔地域から平常時に放出される熱エネルギーは含まれていないことを付記する必要がある。これらについては、残念ながら、調査結果が少なく本邦全域の合計を推定することはむづかしい。したがって、本概説には2、3の測定例を示すにとどめる。北海道の昭和新山、樽前、雌阿寒岳の顕著な噴気孔については清野の研究¹¹⁾があり、噴出蒸気の温度と量の測定が行なわれているので、これを用いて噴出熱量 Q_1 を概算して第5表に示した。昭和新山については3噴気孔に

第5表 活火山（北海道）の噴気孔から放出される熱量

活火山名	噴気孔	噴気孔の温度 (°C)*	噴気の温度 (°C)*	水蒸気量 (kg/sec)*	噴出熱量 (cal/min)	熱階級
昭和新山	亀甲岩	746	314	8.5	37×10^7	V
	円頂丘東側	202	160	0.049	0.2 "	
	円頂丘側部割目	—	—	1.2	4.7 "	
樽前火山	円頂丘南東側	328	286	3.9	17×10^7	IV
雌阿寒岳	噴火口の北側	95	—	0.042	0.2×10^7	VII
	北東麓「大吹き」	148	120	190	730 "	
	「大吹き」の西側	95	83	0.066	0.3 "	

* 清野の測定値

対し測定が行われているが、最大の亀甲岩噴気孔の値が得られているので、熱階級はVとして大差ないであろう。樽前においては噴気孔の数は少ないので熱階級をIVとした。雌阿寒岳では数か所噴気孔があるが、3か所が測定され、しかも最大の“大吹き”が測定されているので熱階級をVIIとした。

兎に角、1火山の山頂部の平常時における噴気孔地域からの熱エネルギーは、顕著な温泉特に沸騰泉地域または地熱地帯からの熱エネルギーと少くとも同等の値を示すことは特記する必要がある。したがって、本邦では歴史時代以後に活動の記録のある活動的火山はかなりの数であるからもしこれらの地域をも温泉地域に加える場合には、前に求めた本邦全域の総熱エネルギーの値にはかなりの修正を加えなければならないかも知れない。

もう一つ是非述べておかなければならないことは、現在推定されている各温泉地の熱エネルギーおよび全国の総熱エネルギーの値は将来変化し得るということである。

近年、中規模以上の温泉地では温泉開発が進み温泉削井が増加し総湧出量が増大し総湧出熱量も増加したが、その半面温泉の水圧低下がおこり個々の湧出量が減少したため、増掘や動力によ

第6表 修善寺温泉の熱エネルギー Q_1 の年次変化

(益子, 甘露寺による)

年次	総採取量 (L/min)	平均動水位* (m)	熱エネルギー Q_1 ** ($\times 10^7$ cal/min)
大正2年	268	100	1.35
昭和17—18年	1,143	90	5.73
〃 25 〃	1,028	87	4.31
〃 27 〃	1,607	—	6.58
〃 30 〃	1,500	—	6.99
〃 31 〃	1,327	78	5.75
〃 32 〃	1,534	64	5.93
〃 33 〃	1,243	53	5.06
〃 34 〃	1,552	43	6.42
〃 35 〃	2,004	31	8.28
〃 36 〃	1,747	33	7.10
〃 37 〃	1,595	23	6.55

* 海面上高, ** 地下水温度17℃基準

る揚湯が行なわれ、これが温泉水圧の低下に拍車をかける結果となっている。第6表は修善寺温泉の総湧出量（または揚湯量）と熱エネルギー Q_1 が年々増加の傾向にあることを益子、甘露寺の資料¹²⁾によって1例として示したものである。このような場合は多くの温泉でおこっている。特に、近年新たに地熱開発が行なわれた地域では熱エネルギーの増加は著しいであろう。

昭和43年3月における本邦の温泉総湧出量は1,207, 194L/minであったが、環境庁自然保護局の発表によれば昭和50年3月現在では1,492,961L/minであり、7年間に23.7%増加している。したがって、温度の頻度分布や (Q_2/Q_1) に変化がなければ、全国の温泉地から放出される熱エネルギー Q も、この7年間に24%ほど増加したことになる。それで、今後各温泉地域または全国の温泉地域の熱エネルギーを測定あるいは推定した場合、その年月日を記す必要がある。

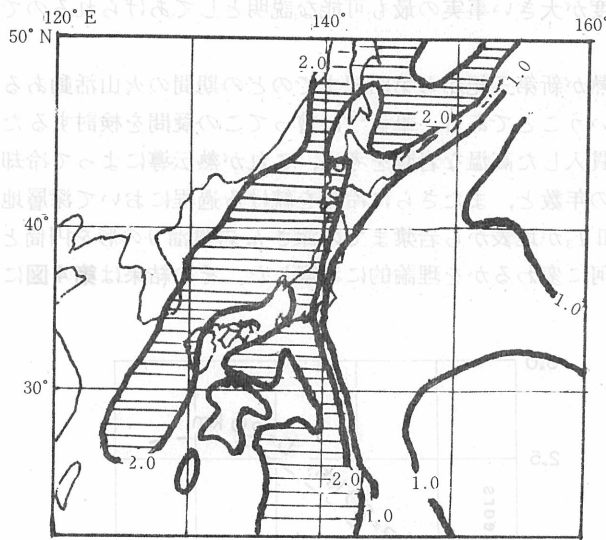
V. 温泉の熱の起源

1. 本邦付近の熱流量の分布

普通の土地では、地表から深さ10~20mの太陽熱の影響する部分を除けば、地下へ100 m入る毎に2~3℃の割合で地温は上昇する。すなわち、地下深くから地表へ向って熱が流れていることを意味する。このような熱を地殻の熱流量と言い 10^{-6} cal/cm²-secの単位（簡単のためHFUと言う）で表わす。近年は陸上、海底を問わず多くの測定がなされている。第3図は日本および付近の熱流量の分布(上田・宝来・安井・渡辺・水谷ら¹³⁾による)を示したものであるが、HFU単位で2以上の比較的大きい部分は東北地方では那須火山帯を含んで西側、山陰地方では白山火山帯を含んで日本海側、九州では中央南北線の西側にあり、温泉の分布とかなりよく一致している。

2. 地殻熱流量の平均値とその熱の説明

地殻熱流量の地球表面全部の平均として、1.2~1.5HFUの値が得られていることは前にも述べたが、この熱の流れの原因は次のように説明されている。地球の表層を構成する地殻の岩石は、地球内部の岩石に比べて多くの U^{238} 、 U^{235} 、 Th^{232} 、 K^{40} 等の



第3図 本邦付近の地殻熱流量(単位HFU) 横線の区域は2.0HFU以上の値の区域(上田・宝来・安井・渡辺・水谷らによる)

放射性元素を含有しているが、これらの元素が崩壊して他の元素に変るとき熱を発生する。JACOBSとAL-LAN¹⁴⁾によれば地殻およびその直下を代表する岩石の1gmが1年間に発生する熱量は第7表のようである。

大陸部分(本邦もその縁辺に当る)の地殻は地震波の研究から、地表から深さ25kmまでは花崗岩質層(密度2.7)25kmから35kmまでは玄武岩質層(密度3.0)と考えられている。断面積が1cm²で地殻の表面から底まで達する鉛直な柱を考え、その柱の内部の岩石から1秒間に放射性元素の崩壊によって発生する熱を計算すると花崗岩質柱から

$$q_1 = 25 \times 10^5 \times 2.7 \times \frac{4.94 \times 10^{-6}}{365 \times 24 \times 60 \times 60} = 1.06 \times 10^{-6} \text{ (cal/sec)}$$

玄武岩質柱から $q_1 = 10 \times 10^5 \times 3.0 \times \frac{1.58 \times 10^{-6}}{365 \times 24 \times 60 \times 60} = 0.15 \times 10^{-6} \text{ (cal/sec)}$

第7表 地殻および地殻直下を代表する岩石中の放射性元素による発熱量(cal/gm-yr)(JacobsdとAllanによる)

岩石の種類	U ²³⁸	U ²³⁵	Th ²³²	K ⁴⁰	計
Granite-granodiorite	2.087 × 10 ⁻⁶	9.86 × 10 ⁻⁸	2.10 × 10 ⁻⁶	0.651 × 10 ⁻⁶	4.94 × 10 ⁻⁶
Basalt	0.648 × 10 ⁻⁶	3.052 × 10 ⁻⁸	0.672 × 10 ⁻⁶	0.231 × 10 ⁻⁶	1.58 × 10 ⁻⁶
Dunite(地殻下)	0.935 × 10 ⁻⁸	4.51 × 10 ⁻¹⁰	0.966 × 10 ⁻⁸	0.252 × 10 ⁻⁹	1.97 × 10 ⁻⁸

全体からは 計1.21 × 10⁻⁶ (cal/sec)

となる。この値は前に述べた地表から流出する熱流量の平均値とその程度が一致しているの、地下に特種な熱源のない普通の土地からの熱流量の原因は放射性鉱物の崩壊であろうということになっている。

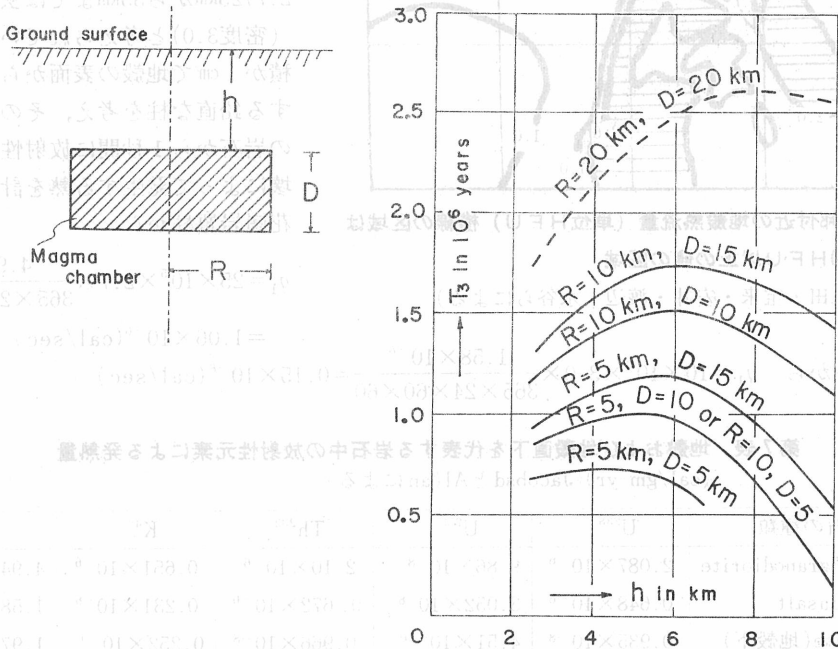
3. 温泉から放出される熱の起源

1 温泉地域から放出される熱エネルギーQをその温泉地域の面積に平均すると第1表に掲げたように地殻熱流量と同じ単位で10~3000という大きな値となる。すなわち、温泉の熱は狭い面積に地殻熱流量に比較して非常に大きい熱が放出されているのであって、地下に特種な熱源のあることを暗示している。

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、これは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熱が供給されて

いるという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¹⁵⁾は曾ってこの疑問を検討するために、地下数kmの深さに更に深い所から貫入した高温な岩漿を考え、これが熱伝導によって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と考えてその半径 R と厚さ D によって如何に変わるかを理論的に考察した。その結果は第4図に



第4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

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 90cal/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 は岩漿貫入後固化を経て地表における地中温度の鉛直勾配が普通の土地の値 $30 \times 10^{-5}\text{deg/cm}$ の2倍に低下するまでの年数とした。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った。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。

とにかく、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、何か実質的な資料によって論ずることが望ましいので、福富¹⁶⁾は本邦の温泉の分布密度と湧出場所の岩石との関係を統計的に考察することを試みている。

本邦の地質図によれば、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線分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区域(I)とする。これは、これらの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が、少くとも熱的には連絡していると考えたのである。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2種の区域に分けた。すなわち、区域(I)以外で第四紀火山帯の直ぐ延長上にある新第三紀火山岩の区域を(II)、かなり広い面積の第三紀火山岩地域で第四紀火山帯の延長とは考えられない区域を(III)とする。次に、(III)と他の条件は同じであるが、新第三紀の火山岩の代りに貫入岩の区域を(IV)とし、古第三紀以前の火成岩の区域、あるいは広い面積が地質時代に関係なく堆積岩である区域を(V)とする。ほぼ本邦全域についてこれらの5区域の占める面積とその各域内の温泉地数を求め、温泉地数は5区域総数に対する百分率で表わし、また他区域と温泉分布の疎密を比較できるように各区域の面積を1000km²に換算したときの温泉地数を温泉地密度と定義して第8表に示した。

第8表 5区域の面積、温泉地数および温泉地密度

区域	面積 S × 10 ³ km ²	温泉地数 N %		温泉地密度 D %	
		(1)の場合	(2)の場合	(1)の場合	(2)の場合
(I)	139.2	88.2	93.2	0.634	0.670
(II)	15.85	5.4	—	0.340	—
(I + II)	155.1	93.6	—	0.605	—
(III)	40.19	1.76	1.86	0.044	0.046
(IV)	7.26	0.53	0.56	0.073	0.077
(III + IV)	47.45	2.29	2.42	0.048	0.051
(V)	132.14	4.07	4.30	0.031	0.033
全 域	334.7	100.0	100.0	0.297	0.297

表から判るように、温泉地数は全国の88%が区域(I)に存在するが、温泉地密度も他の区域よりも大きく、区域(II)がこれに次ぎ、その他の区域では問題にならない程に小である。区域(III)と(IV)は火山岩か貫入岩かの違いはあるが、どちらも新第三紀火成岩の区域で他の条件は同様であるから合併して区域(III+IV)として温泉地密度を求めると0.048で区域(II)の1/5程度に過ぎなく区域(II)の密度はむしろ区域(I)に近い。区域(I)と(II)の違いは第四紀火山帯上にある場合と第四紀火山岩の露出はないが第四紀火山帯の直ぐ延長上にある場合との違いである。それで勝手な考え方であるかも知れないが、区域(II)の地下には第四紀火成岩が潜在すると仮定して、区域(I)と(II)を合併して区域(I+II)とした場合を(1)、区域(II)を考察から除外した場合を(2)とした2つの場合について考えを進める。(2)の場合も第8表中に示してある。

区域(I)~(V)の全域において(2)の場合は(II)を除く、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 Nq および Dq 、新第三紀火成岩を熱源とすると思われるこれらを Ni および Di 、これらの岩漿性熱源のない普通の土地の地下熱に起因するこれらを Nn および Dn と

し、区域(I), (II), ……(V)の面積を 10^3km^2 を単位としてそれぞれ $S(I), S(II), \dots S(V)$ 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し、普通の土地の地下熱もすべての区域に存在するから、温泉地密度については

$$Dq + Dt + Dn \approx D(I + II) \quad (3)$$

$$Dt + Dn = D(III + IV) \quad (4)$$

$$Dn = D(V) \quad (5)$$

および、温泉地数(%)については次の関係がある。

$$Nq = Dq\{S(I) + S(II)\} \quad (6)$$

$$Nt = Dt\{S(I) + S(II) + S(III) + S(IV)\} \quad (7)$$

$$Nn = Dn\{S(I) + S(II) + S(III) + S(IV) + S(V)\} \quad (8)$$

但し、(2)の場合には(3)式の $D(I + II)$ を $D(I)$ とし、(6)~(8)式の $S(II)$ はないものとする。(3), (4), (5)式の右辺は第8表に示されているから Dq, Dt および Dn が求められ、これらを(6), (7), (8)式に代入すれば Nq, Nt および Nn の値が求められる。これらの結果を第9表に示した。すなわち、温

第9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(%)

温泉の熱源と考 えた岩石名	その岩石が占める 区域	その面積 S $\times 10^3\text{km}^2$	温泉地数 N %	温泉地密度 D %
第四紀火山岩	(I)+(II)*	155.1(139.2)	(Nq)86.2(86.2)	(Dq)0.556(0.619)
新第三紀火成岩	(I)+(II)*+(III)+(IV)	202.6(136.7)	(Nt) 3.4(3.3)	(Dt)0.017(0.018)
熱的に普通と考 えられる岩石	全 域	334.7(318.8)	(Nn)10.4(10.5)	(Dn)0.031(0.033)

* (2)の場合には除く、()内の数字は(2)の場合

泉地密度として $Dq = 0.556$ ((2)の場合は 0.619)、 $Dt = 0.017$ (0.018)、 $Dn = 0.031$ (0.033)が得られた。これは、例えば第四紀火山岩の区域内のある面積に新第三紀火成岩を熱源とする温泉地が1か所あるとすれば、その面積中に通常の土地の地下熱に起因する温泉地が約2か所と第四紀火成岩に原因する温泉地が33~34か所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ついては、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9表に示されるように、 $Nq = 86.2\%$ 、 $Nt = 3.4\%$ 、 $Nn = 10.4\%$ である。すなわち、全域に存在する温泉地総数の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%が岩漿性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。この全域の面積は第9表に示したように、 $335 \times 10^3\text{km}^2$ ((2)の場合には $319 \times 10^3\text{km}^2$)であり、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% ((2)の場合88%)に当る。したがって、この結論は、その大勢において、本邦全域の温泉熱の起源に対する結論と考えて差支えないであろう。この結果は前に述べた理論的考察とも矛盾しない。また、第10表に示したように、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、新第三紀火成岩区域の温泉については $30^\circ \sim 50^\circ\text{C}$ の場合が69%を占めている事実とも合致する。

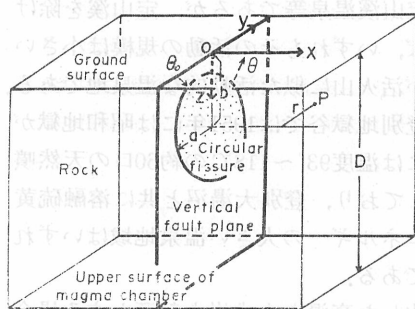
普通の土地の地下熱に起因すると思われる温泉の起源の問題については後に述べる。

第10表 (I+II), (III+IV)および(V)の3区域における温泉温度の頻度の比較

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

温泉の水の起源の問題は本総説の目的ではないから、略説するに止めるが、GORANSON¹⁷⁾によれば岩漿中には数%の飽和水を含むが、岩漿が浅い場所にまで上昇すると圧力の低下により、また岩漿の固化によっても水の一部は有離する。温泉水に含まれる岩漿水の推定についてはアメリカではO¹⁸, D, Tの含有量の測定から実質的にはほとんど循環水起源であると言われている。本邦でも熱収支の調査から山下¹⁸⁾は別府で約7%, 湯原等¹⁹⁾は箱根でおよそ5%が岩漿水起源と推定している。

温泉水は全部循環水と仮定し、これが岩漿溜り上部の岩石の割れ目中を流動する間に周囲の岩石から熱伝導により熱を受け地表に湧出する場合に如何なる熱エネルギーを持つかを簡単な模型について理論的に考察した例²⁰⁾を次に掲げる。第5図はその模型であるが、上面は地面(温度0°),

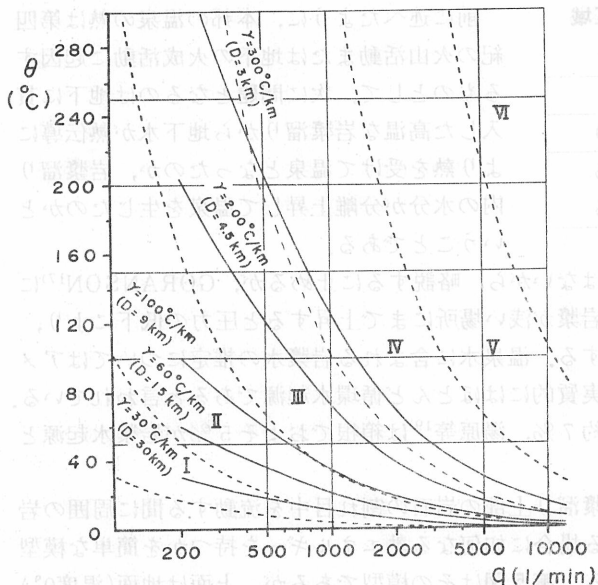


第5図 岩漿溜り上部岩石中の地面に垂直な円形の割れ目の模型

その下面(温度T₀)は岩漿溜りの上面で地表からの深さD, この両面の間の岩石中には地面に垂直な断層面があり、この断層面内に地表から深さbに中心をもつ半径aの円形の割れ目が存在し、この割れ目内には地下水が充満しているとする。2本の断熱壁をもつ細い導水管が地表から割れ目に通じ、1本からは温度0°の地下水が流入し、他の1本からは割れ目内で周囲の岩石から熱伝導により熱せられて温度θとなった温湯が一定の水量qで地表に流出している平衡状態を考える。この割れ目を含む断層面から十分に隔った岩石中では地表から岩漿上面まで一様な温度勾配 $\gamma = \frac{T_0}{D}$ であるとすると、この様な場合に湧出量qによって湧出温度θが如何に変るかを示したのが第6図中の実線である。但し、岩石の熱伝導率の値としては火山岩または水成岩の値として $3.5 \times 10^{-3} \text{ c.g.s}$ を用い、aの値として北海道の主要温泉地で見られる割れ目の最大級の大きさとしてa = 1 kmを、流動する地下水の最大深度はあまりよく判っていないが2~3 kmといわれているのでa + b = 3 kmすなわちb = 2 kmとし、岩漿溜りの深さは地震学や地球磁気学の研究から3~12 kmといわれているのでD = 30 km, 15 km, 9 km, 4.5 kmおよび3 kmとし、岩漿溜り上面の温度は900°Cとした。したがって、地温勾配γの値としては30°C/km, 60°C/km, 100°C/kmおよび最高級として300°C/km, 湧出量qは200~12000 L/minとして計算した。また、図中の点線は第3表に示した温泉の熱階級の0からIVまでの境界の熱エネルギーを示すθとqとの関係を計算して示したものである。

図において最も右側の実線は地面下岩漿までの深さが3 kmで円形の割れ目が深か1 kmから岩漿上面に達する場合で、湧出量が3000 L/minで温度が約50°C, 1300 L/min以下では温度は100°C以上で、実在可能な地下水起源の温泉の最高温級かそれに近い場合である。さて、これらの実線と点線で示した各熱階級の境界とを比較してみると、温泉地域総数のおよそ86%に当る熱階級III以下、すなわち熱エネルギーが 10^8 cal/min 以下の温泉地域は何れもこれら実線の範囲内にあるので、

前に述べたように、本邦の温泉の熱は第四紀の火山活動または地下の火成活動に起因するものとして、次に問題となるのは地下に貫入した高温な岩漿溜りから地下水が熱伝導により熱を受けて温泉となったのか、岩漿溜り内の水分が分離上昇して温泉を生じたのかということである。



第6図 岩漿の上にある岩石中の鉛直な円形裂罅内を地下水が流動する途中、周囲の岩石から熱伝導により熱せられて生じた定常的温度上昇、但し考えられる最大値として $a=1.0\text{km}$, $b=2.0\text{km}$, $k=3.5 \times 10^{-3}\text{c.g.s.}$ とする

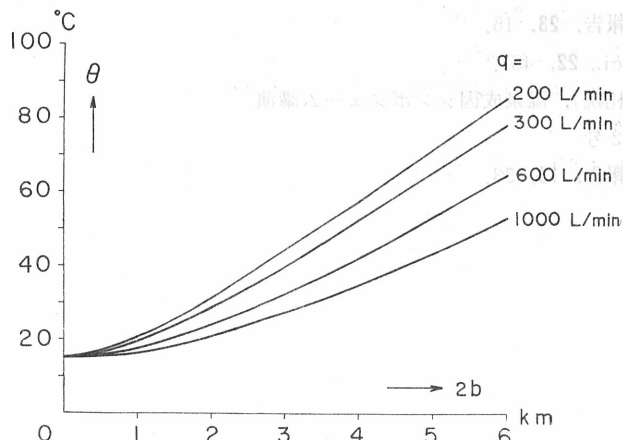
小規模な水蒸気爆発をおこしたことがあり、アトサヌプリには温度 $93^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{C}$ の約60口の天然噴気孔があり、少量の CO_2 , H_2S , SO_2 を含む水蒸気を噴出しており、登別大湯沼と共に熔融硫黄が確認されている。このように活動的な熱階級V以上の熱エネルギーの大きい温泉地域はいずれも第四紀火山帯の中心帯に存在していることは注意すべきである。

ここで少し前に戻って、上記のように地下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あるいは地質時代を問わず堆積岩の地域等から湧出する温泉の成因について考えてみよう。例えば造山運動による皺曲熱、放射性鉱物の量が異常に多いための発熱、地球中間層から地殻を通じ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地下特種熱源によって、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よりも正の異常を呈するはずである。上田・宝来等²¹⁾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、このような地域、すなわち先に区域(V)とした地域にも全国温泉地総数のおよそ10%に及ぶ温泉が存在し、その温度は比較的低温で、第10表に示したように、 50°C 以下のものが83%を占めていることは前に述べた。

このような理由で、地殻熱流量には正の異常がない普通の地下増温率の土地に普通の地下水が地下の割れ目内に流動して湧出する場合を考えるために、前に述べたと同じ模型(第5図)を用いたが、この場合円形の割れ目(半径 a)は地面に接するとし、したがって、円の中心の深さ b は $b=a$ とし、地面温度と流入する地下水の温度は共に本邦中緯度の地下水温度 15°C とした。また地下の増温率は $\gamma=30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ とする。流出する温泉の湧出量 q としては、熱階級I, II, IIIの平均はそれぞれ210L/min, 290L/min, 730L/minであるから、 $q=200, 300, 600$ および1000L/minとし、円形の割れ目の最下底の深度 $2b$ を $0\sim 6\text{km}$ として計算した。その結果は第7図に示

地下水起源の温泉と考えても説明可能である。しかし、熱階級がV以上、すなわち、熱エネルギー $10^{8.5}\text{cal}/\text{min}$ 以上の大きな熱エネルギーをもつ温泉地域の温泉は地下水起源のみとしては到底説明し得ない。その数は全温泉地数の5%程度に過ぎないが、熱エネルギーの見地からは温泉総エネルギーのおよそ50%にも当るので重要であって、これらの温泉の熱を説明するためには岩漿から直接上昇した熱水を考えるが、少なくともこの熱水が地下水起源の温泉に加わっていると考えざるを得ない。

熱階級がV以上の温泉地は例えば北海道(第1表)では、登別の湯沼地区および地獄谷、川湯温泉からアトサヌプリ(屈斜路硫黄山)噴気孔の地区と定山溪温泉等であるが、定山溪を除けば、いずれもその活動の規模は小さいが活火山に似た活動的な温泉地である。登別地獄谷では1951年には昭和地獄が



第7図 普通の地下増温率の場合、流動する地下水が存在する岩石中の割れ目の深さ $2b$ によって温泉の温度が如何に変わるかを示す図

されている。普通の場合 $2b$ は2~3 kmと言われているが、この場合には湧出温度は 50°C 以下にしかない。しかし、 $2b=6\text{ km}$ とすれば $50^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{C}$ の温泉が期待できる。本邦のように地殻変動が激しく大地震が頻発する地域では、地下水の流動の可能な深くて面積の大きい割れ目が生ずることも考えられる。すなわち、地下に特別な熱源がない地域に、全国温泉地総数のおよそ10%にも当る数の温泉が存在することは上記のような機構を考えれば、一応説明可能である。

VI. 結 言

以上に、各温泉地および本邦全温泉地域から放出される熱エネルギーの概値について述べたが、前に述べたように、まだ資料不足で正確な値は今後の調査結果にまたなければならぬ。これらの値は温泉の開発に伴って年々かなり増加しつつあるが、中規模以上の温泉地では温泉開発に伴って温泉の氷圧低下(1例第6表参照)がおり、いわゆる枯渇現象が問題になっていることも述べておかなければならぬ。

また、温泉の熱エネルギーの原因についても簡単に述べたが、これも未解決の部分が少くないことを申し添えておく。

参 考 文 献

- 1) 須川 明:(1960) 北大地球物理学研究報告, 7, 63.
福富孝治他:(1968) 北大地球物理学研究報告, 19, 1.
- 2) White, D. E:(1969) Jour. Geophy. Res., 74, 5191.
- 3) Fukutomi, T.:(1961) Journ. Fac. Sci. Hokkaido Univ., series VII, 1, 315.
- 4) 湯原浩三:(1968) 地熱, 16
- 5) 松尾岑一郎他:(1972) 地熱, 33, 16.
- 6) White, D. E:(1957) Bull. Geol. Soc. America 68, 1937.
- 7) 湯原浩三:(1964) 大分県温泉調査研究会報告, 15, 15.
- 8) 渡辺和衛:(1958) 地学雑誌, 67, 127.
- 9) Benseman, R. F.:(1959) Jour, Geophy. Res., 64, 1057.
- 10) 福富孝治:(1970) 北大地球物理学研究報告, 23, 9.
- 11) 清野正明:(1959) 火山2集, 3, 125.
- 12) 甘露寺泰雄, 益子 安:(1975) 温泉工学会誌, 10, 16.
- 13) 1例として上田誠也:(1967) 火山2集, 12, 41.
- 14) Jacobs, Russel & Wilson:(1959) physics and Geology, P.110.
- 15) Fukutomi, T.:(1960) Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII, Vol. 1, No.4, 223.

- 16) 福富孝治：(1970) 北大地球物理学研究報告, 23, 15.
- 17) Goranson, R. W. : (1931) Amer. J. sci., 22, 481.
- 18) 山下幸三郎：(1970) 日本温泉科学会（札幌），温泉成因シンポジウム講演
- 19) 湯原浩三：(1968) 火山, 第2集, 13, 2号
- 20) 福富孝治：(1965) 北大地球物理学研究報告, 13, 53.
- 21) 前掲13)

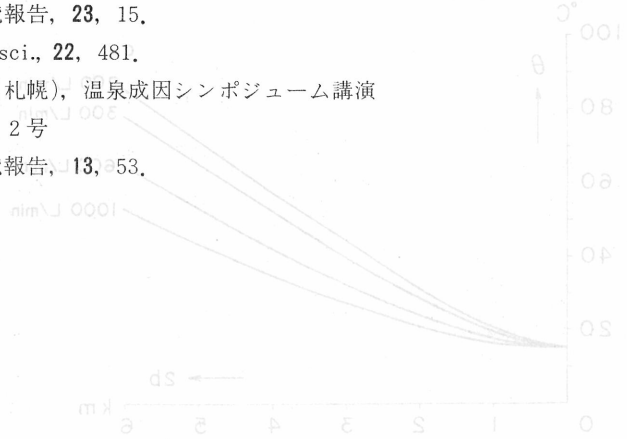


図 1 普通に地下に下る水が、地中の温度が深くなるにつれて、その速度が速くなることを示す図

地中の温度が深くなるにつれて、その速度が速くなることを示す図

以上、各温泉の地温分布を比較すると、地温が深くなるにつれて、その速度が速くなることを示す図

参考文献

- 1) 東川 明：(1960) 北大地球物理学研究報告, 7, 69.
- 2) 福富孝治：(1968) 北大地球物理学研究報告, 19, 1.
- 3) White, D. E. : (1969) Jour. Geophys. Res., 74, 5191.
- 4) Fukutomi, T. : (1961) Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Series VII, 1, 315.
- 5) 湯原浩三：(1968) 地熱, 16.
- 6) 松尾孝一：(1972) 地熱, 33, 16.
- 7) White, D. E. : (1957) Bull. Geol. Soc. America, 68, 1937.
- 8) 湯原浩三：(1964) 大分県温泉調査研究会報告, 15, 15.
- 9) 湯原浩三：(1958) 地学雑誌, 67, 127.
- 10) Benzeman, R. F. : (1959) Jour. Geophys. Res., 64, 1057.
- 11) 福富孝治：(1970) 北大地球物理学研究報告, 23, 9.
- 12) 湯原浩三：(1959) 火山 2集, 3, 125.
- 13) 甘藷寺孝雄, 益子 安：(1975) 温泉工学会誌, 10, 16.
- 14) 湯原浩三：(1967) 火山 2集, 12, 41.
- 15) Jacoby, Russell & Wilson : (1959) physics and Geology, P.110.
- 16) Fukutomi, T. : (1960) Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Series VII, Vol. 1, No. 4, 223.