

箱根大涌谷・早雲山地熱地域からの放熱量

湯原 浩三* 大久保 太治** 竹内 三郎***

Mass and Heat Discharged from Owakudani and Sounzan
Geothermal Areas, Hakone Volcano

By

Kōzō YUHARA, Taiji OKUBO & Saburō TAKEUCHI

Around the central cones of Hakone Volcano, there are several solfataric fields and many hot springs. Among them, Owakudani and Sounzan geothermal areas, including Ubako, Kaminoyu and Gora hot springs, are the main ones. In these areas, we have measured mass and thermal discharges from steam wells, fumaroles, steaming grounds, hot springs and thermal conduction through soil. The methods of measurement are outlined and the results are summarized. Total mass discharge from these areas amounts to 129 kg/sec and total thermal discharge amounts to 10.64×10^6 cal/sec which is equivalent to 1×10^{22} erg/year, corresponding to a mesoscale volcanic eruption a year.

In Japan, as there are about twenty geothermal areas having the same scale as Owakudani-Sounzan area, thermal discharge from all geothermal areas may be estimated roughly as 2×10^{23} erg/year. Adding to this the energy released by the volcanic activity, 7×10^{23} erg/year, by the usual hot springs, 1.1×10^{24} erg/year, and by the normal heat flow of non-volcanic regions, 7.3×10^{24} erg/year, we can estimate the total energy released from whole Japan, except by earthquakes, as about 9×10^{24} erg/year.

要 旨

箱根火山の神山中央火口丘の北麓にある大涌谷・早雲山地熱地域において、噴気孔、噴気井、温泉から噴出している水量およびそれによって運び出されている熱量を測定した。それと土地の熱伝導によって放出される熱量と下方の温泉地から放出される水量、熱量をあわせると、噴出水量 129kg/sec, 0°C 基準の放熱量 10.64×10^6 cal/sec が得られた。この熱量は1年間では 1×10^{22} erg となり、中規模の火山爆発のエネルギーに相当する。

また、日本にはこの程度の地熱地域が約20箇所存在するので、日本の地熱地域からの放熱量は大略 2×10^{23} erg/year となる。これに、火山活動によるエネルギー 7×10^{23} erg/year と普通の温泉によって運び出される熱量 1.1×10^{24} erg/year と火山温泉地域以外からの熱流量 7.3

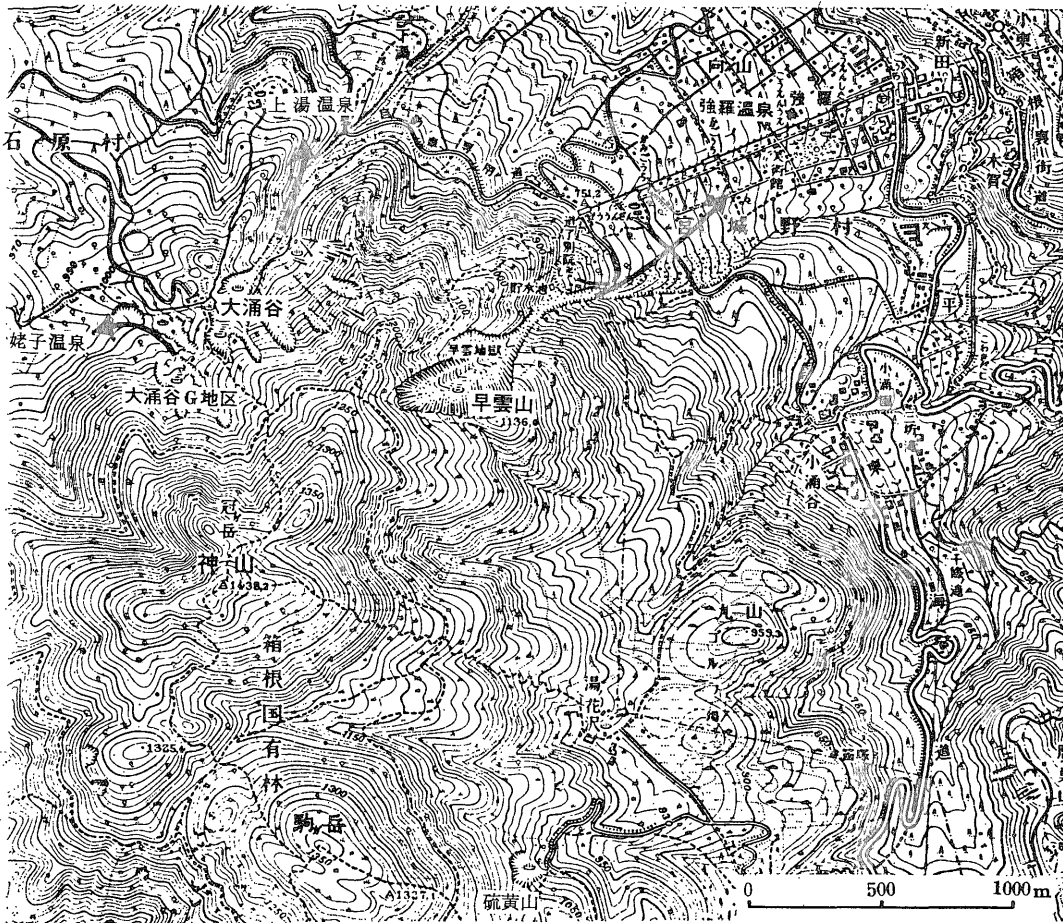
$\times 10^{24}$ erg/year とをあわせると、日本全土から1年間に放出されるエネルギーは、地震によるものを除いて、約 9×10^{24} erg/year となる。

1. 緒 言

箱根火山の中央火口丘である神山、駒ガ岳の周辺には、大涌谷・早雲山・小涌谷・硫黄山などの地熱地域があって、噴気活動をしている(第1図)。その中で大涌谷と早雲山は他に比べて規模が大きく、広範囲に厚い変質帯でおおわれ、過去に何回も典型的な火山性地すべりが発生している。大涌谷では、火山性地すべりに関連して、今までに多くの人々によって各種の調査研究が行なわれている。いっぽう早雲山のほうは、地形が急峻なためと危険が伴うために、まだあまり系統的な調査研究は行なわれていないようである。

大涌谷にも早雲山にも、天然の噴気孔のほかに、地すべり防止あるいは温泉造成のために掘られた簡単な噴気

* 国立防災科学技術センター 第3研究部
** 応用地質部
*** 技術部



第1図 箱根中央火口丘周辺の地熱地域と地下における温泉水の流動方向(→)

井が多数あって、盛んに噴気を噴出している。また諸所に温泉も湧出していて、それらは集められて、噴気と水道水から造成された温泉水と共に、強羅・仙石原方面へ送られている。

火山性地すべりが発生するのは、岩石が噴気や温泉の作用で変質し粘土化し、それに降雨や融雪などの直接的原因が加わるためであるといわれているが、噴気や温泉による変質は、いっぽうではもちろんその化学的な作用によるが、他方ではその熱エネルギーによるところも大きい。しかし、これまで、化学的な調査研究にくらべて熱的な調査研究はおこなわれていて、たとえば、大涌谷の地すべり地域からどの程度の熱量が放出され続けているのか、さらにそれがどのように消長しているのか、というような疑問に答えるに必要な資料はほとんどみあたらない。また、このような地熱地域からの放熱量は、当然のことながら、火山の熱源に関する有力な情報の1つとし

て重要である。

そこで、筆者らは、昭和41年3月から昭和42年11月にかけて、大涌谷・早雲山の両地域において放熱量の測定を行なった。もちろん、このような地熱地域からの放熱量を測定するための確立された方法があるわけではないので、この測定のために、筆者らによって、2、3の測定器が考案試作された。

なお、この調査研究にあたっては、全般的に、応用地質部環境地質課の安藤武技官の御配慮を戴いた。また、現地での測定には、防衛大学校関岡満助教授、関東学院大学伊藤芳朗教授の御協力を戴き、さらにまた、関東学院大学の学生諸氏の労をわずらわした。ここに併せて感謝する。

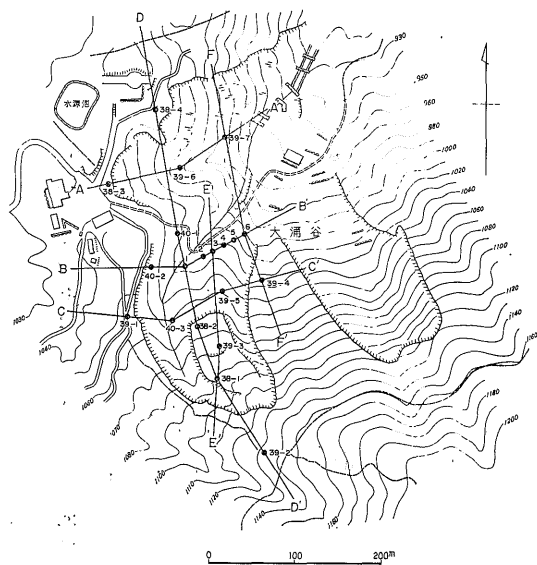
2. 大涌谷と早雲山の関係

第1図にみるように、大涌谷と早雲山は、神山からほ

第1表 大涌谷の試錐井内の温度 (安藤・大久保, 1966による)

深度(m)	温度(°C)	深度(m)	温度(°C)	深度(m)	温度(°C)	深度(m)	温度(°C)
No. 38-1		No. 39-3		No. 40-2		神 No. 3	
8.00	30	18.10	40	10.00	30	10.00	15
13.00	45	32.00	105	20.00	54	15.00	22
15.00	82	40.00	116	25.00	71	20.00	30
24.00	90	No. 39-4		29.00	81.5	30.00	35
27.00	118	8.70	18	35.00	100	40.00	42
No. 38-2		16.00	23	45.50	110	50.00	43
4.00	20	24.40	57	No. 40-3		59.00	51
15.00	72	31.10	78	5.00	97	71.00	62
21.00	81	37.20	88	10.00	100	79.00	65
26.00	95	40.20	110	15.00	103	89.00	68
No. 38-3		No. 39-5		20.00	106	99.00	68
2.00	10	5.85	32	25.00	106	神 No. 4	
7.00	17	12.90	56	30.00	106	20.00	32
10.00	17	15.60	67.5	35.00	107	25.00	35
14.00	25	17.00	75.5	神 No. 1*		30.00	40
23.00	25	19.60	63.5	10.00	31	40.00	56
29.00	25	22.00	67	15.00	39	50.00	63
33.00	43	25.90	72	20.00	41	55.00	64
No. 38-4		31.90	79	24.00	45	65.00	65
10.00	11	38.50	97	34.00	54	77.00	71
18.00	13	40.40	120	40.00	56	81.00	75
No. 39-1		No. 39-6		49.00	67	神 No. 5	
4.00	17	4.00	19	54.00	72	8.50	28.5
8.00	64	10.35	20	61.00	72	13.00	31.5
12.00	98	16.60	25.5	69.00	79	25.00	39.5
16.00	103	22.00	32.9	77.00	80	30.00	40
20.00	103	26.60	42	90.00	82	35.00	55
30.00	114	30.25	66.5	神 No. 2		40.00	56.5
36.00	121	No. 39-7		10.00	34	47.00	63
40.00	123	6.90	20	14.00	40	60.00	65
44.00	124	14.18	19.5	30.00	55	65.00	67
48.00	128	19.70	23	45.00	59	70.00	70
52.00	132	27.70	31	50.00	65	75.00	72
56.00	136	30.60	31	60.00	65	79.00	75
60.00	140	No. 40-1		69.00	75	神 No. 6	
64.00	144	15.00	14	79.00	78	10.00	25
70.00	150	22.00	22	89.00	78	15.00	30
No. 39-2		27.00	29	99.00	78	30.00	40
12.60	20	30.00	39				
18.00	22	40.00	41				
33.60	35	45.00	43				
40.00	40						

* 神奈川県土木部砂防課の資料



第2図 試錐地点分布図

ほ北に走る尾根をはさんでその東西に位置し、その上部は水平距離にして500mほどしかはなれていない。したがってこれら2つの地熱地域は、地形的にみて共通の熱源によるもののように思われる。

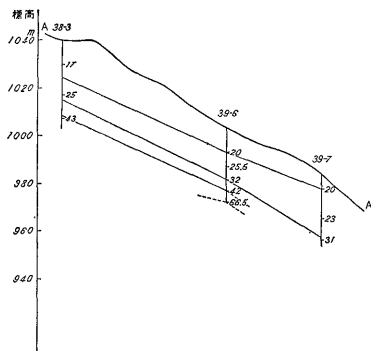
また、大涌谷では昭和29年以来地すべり防止および調査のため多くの試錐が行なわれていて、それらの中のいくつかでは各深度の温度が測定されている。第2図は試錐地点の分布図であり、第1表は測定された温度の資料である。これより、第2図の各測線A-A'、B-B'、C-C'、D-D'、E-E'、F-F'に沿って温度断面図を描くと第3図のようになる。これらを見れば、大涌谷の地下では南東方深所に熱源があるように思われ、その方向は前記の尾根の方向である。

いっぽう早雲山でも、天然の噴気孔のあるのは上部すなわち尾根に近いところである。したがって、これらの事実からも、大涌谷と早雲山の地熱地域の熱源は共通のものであって、神山からほ北に向かう尾根の下にあると想像することができる。

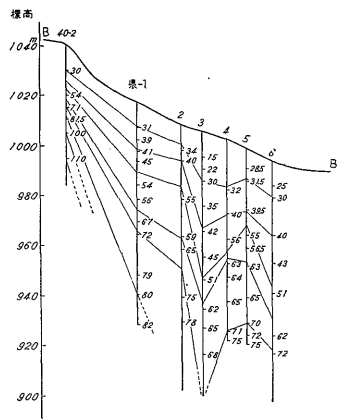
以上の推論から、大涌谷と早雲山の地熱現象を地下にある1つの熱源に由来するものと仮定し、それぞれの地域での放熱量の測定から、この熱源、すなわち箱根火山の中央火口丘である神山の地下にあると思われる熱源からの放熱量を推定する。ただし、湯原他(1966)、大木他(1968)によって、すでに行なわれた強羅温泉に関する調査からは、強羅斜面の地下200~400mのところ温泉帯水層というべきものがあって、早雲山のほうから温泉水が地下を流下していることが明らかになっている。また、

姥子温泉も温泉水が大涌谷から流下してきたものであり、上湯温泉もその熱源は大涌谷にあるものと思われるので、前記熱源からの放熱量を評価する場合には、これらの温泉による放熱量も併せて考えなければならない。

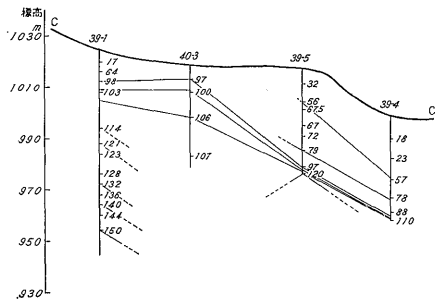
小涌谷・硫黄山の地熱地域、およびこれらに関連の深いと思われる湯の花沢温泉、芦之湯温泉などからの放熱量は、都合により測定できなかった。もちろん、これらの地域の熱源も前記大涌谷・早雲山について考えた熱源と本質的には同じものであるかもしれない。しかし地理



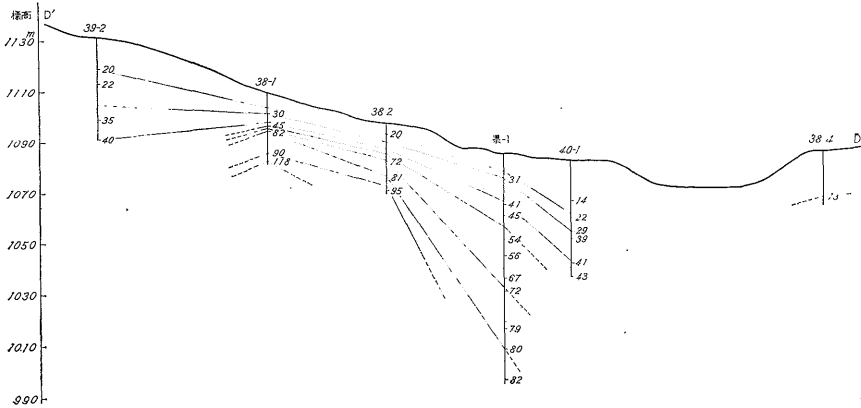
第3図(a) A-A'断面内での地中温度分布, °C



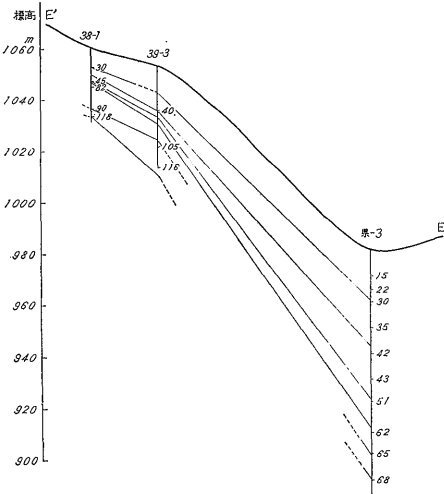
第3図(b) B-B'断面内での地中温度分布, °C



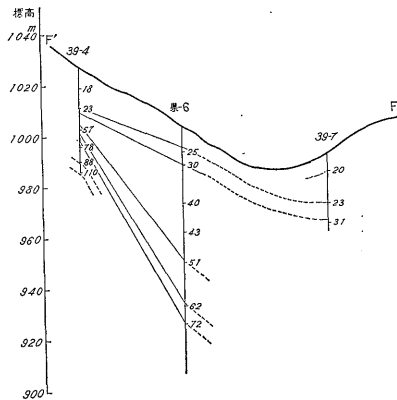
第3図(c) C-C'断面内での地中温度分布, °C



第3図 (d) D-D' 断面内での地中温度分布, °C



第3図 (e) E-E' 断面内での地中温度分布, °C



第3図 (f) F-F' 断面内での地中温度分布, °C

ので、今回の報告からは除外した。いずれは機会を得てこれらの地域でも測定を行ない、箱根中央火口丘からの放熱量としてまとめなければならないと思っている。

3. 大涌谷からの放熱量

大涌谷における火山性地すべりに関する研究では、便宜上大涌谷をAからHまでの8地区に分けている。しかし、G地区以外はすべて大涌谷の谷頭に位置しており、G地区だけが別の流域に属するので、この報告では、G地区以外を単に大涌谷と呼び、大涌谷G地区だけを他から区別した。第4図は大涌谷の全景である。

3.1 噴気による放熱

大涌谷には第5図に示すように、天然の噴気孔と約40の噴気井と20余の温泉が存在する。大涌谷の噴気の組成は、高橋他(1966)によると99%以上がH₂Oである。噴出するH₂Oは一般には飽和水蒸気と水滴の混合流体、すなわち湿り蒸気であって、その乾き度によってエンタルピーは異なるので、H₂Oの噴出によって運び出される熱量を評価するには、その乾き度を知らなければならない。乾き度 x は、混合流体の密度を ρ 、水滴の密度を ρ' 、乾き飽和水蒸気の密度を ρ'' と書くと、

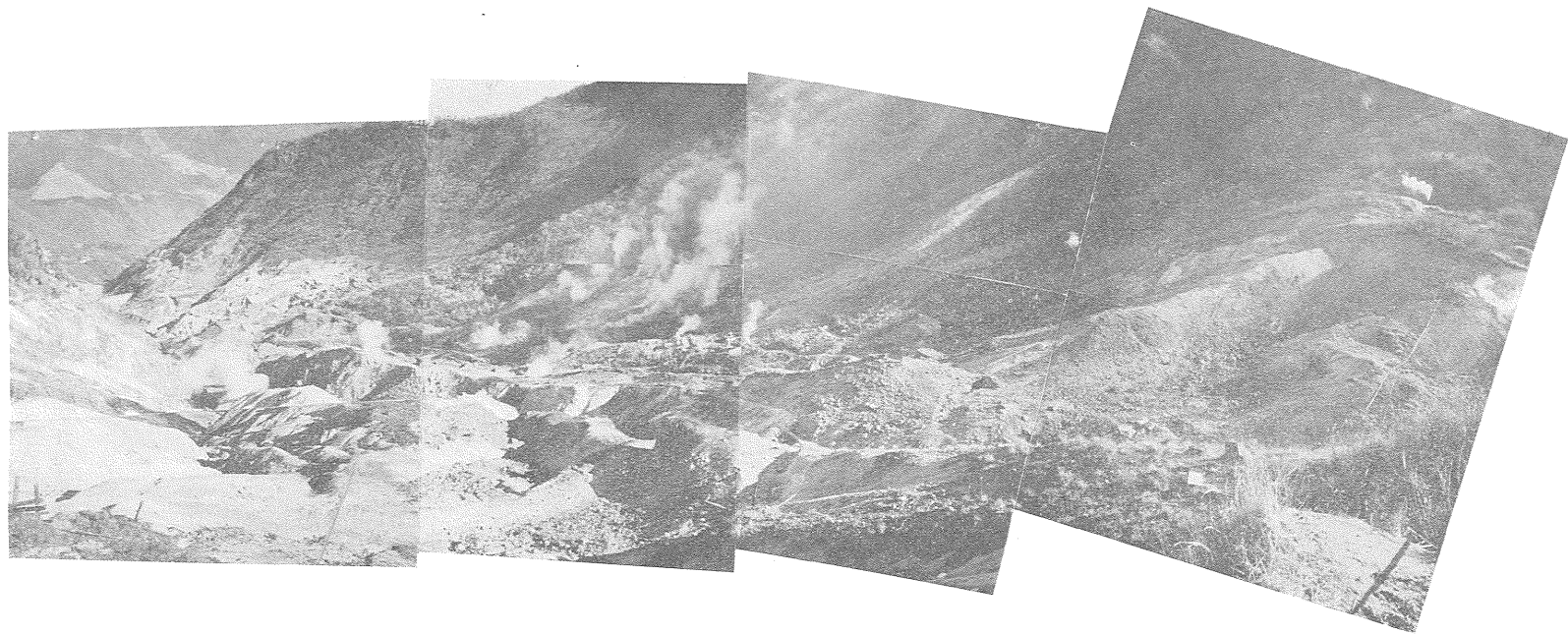
$$x = \frac{\rho'' (\rho' - \rho)}{\rho (\rho' - \rho'')} \quad (1)$$

であらわされる。 ρ' 、 ρ'' は、温度がわかればいずれも飽和水蒸気表から知ることができる。したがって、 ρ を測定すれば、水滴のエンタルピーを i' 、乾き飽和水蒸気のエンタルピーを i'' と書くと、混合流体のエンタルピーは

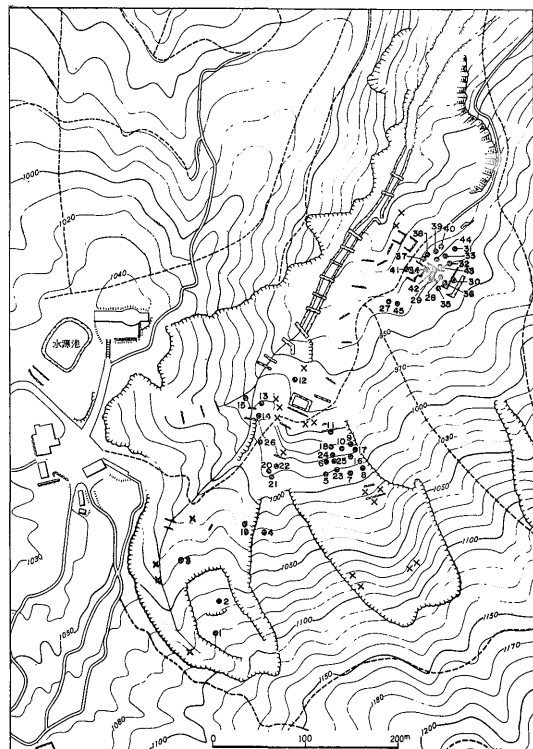
$$i = i' + x (i'' - i') \quad (2)$$

的には、大涌谷・早雲山と小涌谷・硫黄山とはややはなれており、後の2つは前の2つにくらべて規模も小さい

で求まる。また、水滴、飽和水蒸気の噴出質量を m' 、 m'' 、とすると、



第4図 大涌谷全景



第5図 大涌谷における噴気孔と噴気井の分布 (・: 噴気井と測定された噴気孔, ×: 測定されなかった弱い噴気孔と噴気地)

$$m' = a\bar{v}\rho' \frac{\rho - \rho''}{\rho' - \rho''} \quad (3)$$

$$m'' = a\bar{v}\rho'' \frac{\rho' - \rho}{\rho' - \rho''} \quad (4)$$

ただし a は噴出断面積, \bar{v} はその断面内での平均速度で, 円形断面を持つ噴気井の場合, 断面内での指数速度分布を仮定すれば, 中心を通る最大噴出速度 v_{\max} との間には,

$$\bar{v} = 0.77 \bar{v}_{\max} \quad (5)$$

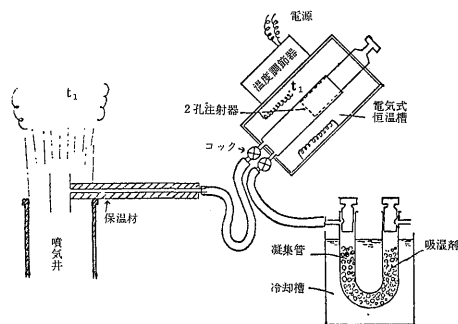
という関係がある。

結局, 水滴と飽和水蒸気の混合流体の噴出によって運び出される熱量 Q_1 は, 0°C を基準にして,

$$\begin{aligned} Q_1 &= m' i' + m'' i'' \\ &= \frac{a\bar{v}}{\rho' - \rho''} \left\{ \rho' i' (\rho - \rho'') + \rho'' i'' (\rho' - \rho) \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

で計算できる。

上の計算によって, 噴出質量や噴出熱量を求めるためには, \bar{v}_{\max} と ρ を実測すればよい。 \bar{v}_{\max} の測定はピトー管と水柱または水銀柱マンオメーターを用いて行なっ



第6図 噴気密度測定法 (直接計量法)

た。 ρ の測定法としては, 湯原 (1967) が概説したようにいろいろあるが, 今の場合, 現地で簡単に測定できることを第1条件として, 直接計量法を用いた。この方法は第6図のように, できるだけ孔口と同じ条件のもとで噴気を一定容量だけ採取して重量をはかる方法である。

第7図は試作された採取装置である。この方法による時に予想される誤差の中で最大なもの, 採取管内の温度が真の噴気温度に保たれないために, 管内で凝縮, 蒸発がおこって, 一定容量の採取ができないためのものである。この誤差を推定するために次のような計算を行なった。

噴気孔口での状態を1とし, 採取管内での状態を2とすると, (1)式より

$$\rho_1 = \frac{\rho_1' \rho_1''}{x_1(\rho_1' - \rho_1'') + \rho_1''} \quad (7)$$

$$\rho_2 = \frac{\rho_2' \rho_2''}{x_2(\rho_2' - \rho_2'') + \rho_2''} \quad (8)$$

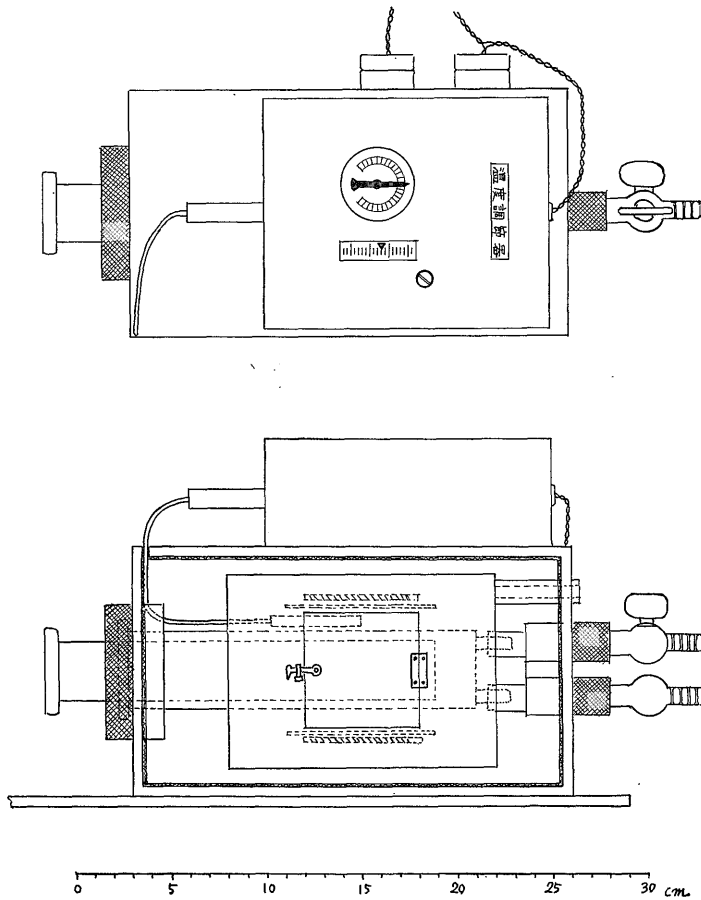
状態1から状態2になるときに, 単位体積あたり q の熱量が加えられ (あるいは取除かれ) たとすると, 2つの状態のエンタルピーの間には,

$$i_2 = i_1 + \frac{q}{\rho} \quad (9)$$

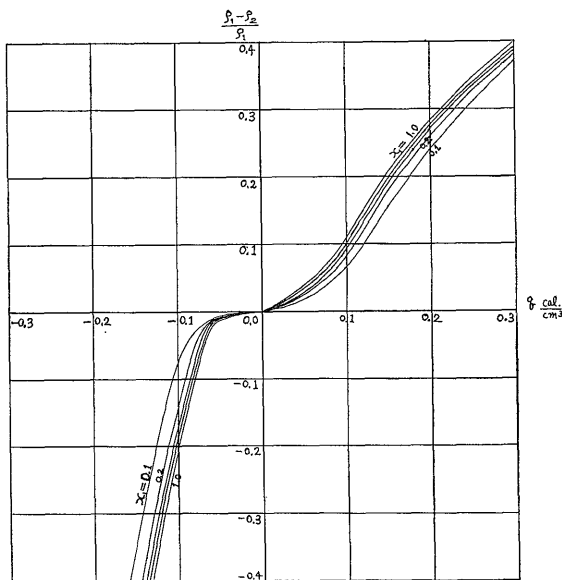
という関係があるから, (2), (7), (8), (9)式から,

$$\rho_2 = \frac{\rho_2'' \rho_2' (i_2'' - i_2')}{\left[(i_1' - i_2') + x_1(i_1'' - i_1') + \left\{ \frac{x_1(\rho_1' - \rho_1'')}{\rho_1' \rho_1''} + \frac{1}{\rho_1'} \right\} q \right] (\rho_2' - \rho_2'') + \rho_2'' (i_2'' - i_2')} \quad (10)$$

が得られる。いまかりに, 状態1の温度が 100°C , 状態2の温度が 105°C または 95°C であるときに, 真の密度 ρ_1 と測定された密度 ρ_2 の差の真の密度に対する割合を, x_1 をパラメーターとして, q の関数として示したものが第8図である。 q は恒温槽内で採取管に出入する熱



第7図 噴気採取管と恒温層



第8図 噴気密度直接計量法の推定誤差

量であって、上の温度条件では $q = \pm 0.1 \text{ cal/cm}^2$ 程度はさげられないから、 $x_1 = 1$ のときは $(\rho_1 - \rho_2) / \rho_1 = 0.108$ 、 $x_1 = 0.1$ のときは $(\rho_1 - \rho_2) / \rho_1 = 0.053$ 程度の誤差は認めなければならない。この測定法では、上に測定した以外の誤差も当然考えられるから、結局普通に行なっても1割程度の誤差が予想されることになる。

第2表は上述の方法で測定した噴気密度およびそれから計算した噴出量と噴出熱量である。第9図は噴気の密度と温度の関係を示したものであって、 100°C 以下のものの密度が大きな範囲で変化し、ほとんど乾いたものからかなりの水滴を含むものまでであることがわかる。また 100°C 以上のものには、過熱状態のものと密度が飽和水蒸気のそれよりやや大きいものがあった。後者には、僅かの微細な水滴かまたは微量の鉱泥やスケールが含まれているのであろう。

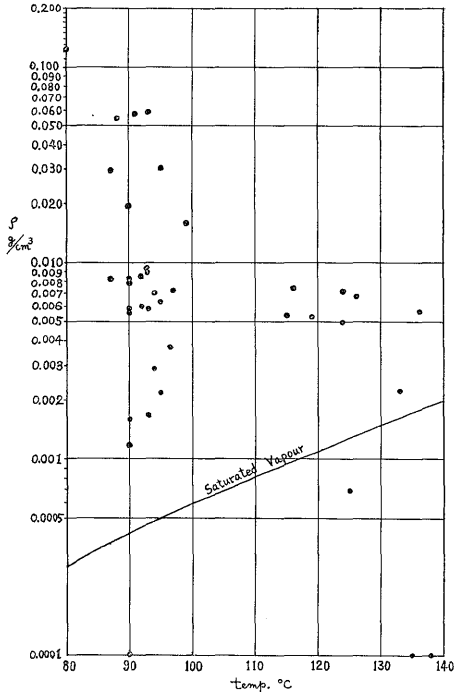
噴気井以外の天然の噴気孔のうち、まとまった孔から噴出しているものは、ドラム管などを利用した簡単な集

第2表 大涌谷の噴気の密度、噴出水量、噴出熱量 (Sは少量を示す)

No.	温度 °C	密度 ρ (g/cm ²)	噴 出 水 量			噴 出 熱 量			湿り度
			m'' (kg/sec)	m' (kg/sec)	m (kg/sec)	Q'' (kcal/sec)	Q' (kcal/sec)	Q (kcal/sec)	
1	94	0.0071	0.003	0.042	0.04	1.9	3.9	5.8	0.93
2	95	0.0310	0.004	0.227	0.23	2.3	21.6	23.9	0.98
3	99	0.0162	0.021	0.593	0.61	13.8	58.8	72.6	0.96
4	93	0.0588	0.002	0.192	0.19	0.9	18.1	19.0	0.99
5	91	0.0580	0.002	0.286	0.29	1.3	26.0	27.3	0.99
6	90	0.0195	0.002	0.100	0.10	1.4	9.0	10.4	0.98
7	133	0.0022	0.244	0.088	0.33	159.1	11.7	170.8	0.26
8	93	0.0090	0.242	0.407	0.65	153.8	410.1	563.9	0.95
9	138	0.0001	0.236	0	0.24	154.3	0	154.3	0.00
10	125	0.0007	0.152	0	0.15	98.6	0	98.6	0.00
	135	0.0001	0.029	0	0.03	19.0	0	19.0	0.00
11	124	0.0071	0.028	0.133	0.16	18.4	16.5	34.9	0.82
12	97	—	—	—	S	—	—	S	—
13	95	0.0063	0.030	0.354	0.38	19.3	33.6	52.9	0.92
14	87	0.0295	0.002	0.196	0.20	1.5	17.1	18.6	0.99
15	116	0.0074	0.223	1.453	1.68	144.1	168.9	313.0	0.87
16	90	0.0012	0.093	0.170	0.26	58.9	15.3	74.2	0.65
17	90	0.0001	0.096	—	0.10	60.9	0	60.9	0.00
18	87	0.0082	0.027	0.577	0.60	17.0	50.1	67.2	0.95
19	97	—	—	—	S	—	—	S	—
20	90	0.0058	0.032	0.409	0.44	20.4	36.8	57.2	0.93
21	80	0.1216	0.003	1.270	1.27	1.7	101.5	103.2	1.00
22	93.0	0.0017	0.084	0.218	0.30	53.1	20.3	73.4	0.72
23	96.5	0.0037	0.076	0.457	0.53	48.4	44.2	92.6	0.86
24	126	0.0068	0.078	0.322	0.40	50.5	40.6	91.1	0.80
25	93	0.0092	0.011	0.214	0.23	7.2	19.9	27.1	0.95
26 a	119	0.0054	0.196	0.788	0.98	126.3	94.0	220.4	0.80
26 b	115	0.0054	0.111	0.515	0.63	71.3	59.3	130.6	0.82
27	136	0.0057	0.088	0.198	0.29	57.4	27.1	84.5	0.69
28	90	0.0083	0.037	0.709	0.75	23.8	63.8	87.6	0.95
29	92	0.0060	0.097	1.199	1.30	61.5	110.4	171.8	0.93
30	90	0.0057	0.033	0.421	0.45	21.1	37.9	59.1	0.93
31	92	0.0086	0.035	0.645	0.68	22.4	59.3	81.8	0.95
32	90	0.0081	0.021	0.395	0.42	13.6	35.6	49.2	0.95
33	124	0.0050	0.099	0.295	0.39	64.1	36.7	100.8	0.75
34	94	0.0029	0.092	0.454	0.55	58.6	42.7	101.4	0.83
35	91	—	—	—	—	—	—	—	—
36	95	—	—	—	—	—	—	—	—
37	90	—	—	—	S	—	—	S	—
38	90	0.0016	0.090	0.255	0.35	57.5	22.9	80.4	0.74
39	97	0.0072	0.074	0.921	1.00	47.3	89.4	136.6	0.93
40	93	0.0058	0.095	1.079	1.17	60.2	100.4	160.6	0.92
41	88	0.0051	0.065	0.966	1.03	41.2	85.0	126.2	0.99
42	85	—	—	—	S	—	—	S	—
43	96	—	—	—	S	—	—	S	—
44	96	—	—	—	S	—	—	S	—
45	95	—	—	—	S	—	—	S	—

第3表 大涌谷の噴気による噴出水量と放熱量

	噴出水量			放熱量			
	水蒸気 (kg/sec)	熱水 (kg/sec)	計 (kg/sec)	水蒸気 (kcal/sec)	熱水 (kcal/sec)	計 (kcal/sec)	
大気中に放出	1.0	10.8	11.7	0.6×10^8	1.0×10^8	1.7×10^8	
温泉造成用に利用	1.9	9.8	11.7	1.2	1.0	2.2	
合計	2.9	20.5	23.4	1.8	2.0	3.8	



第9図 大涌谷の噴気の高さと温度の関係

気装置をかぶせ、そこからの噴出を噴気井とみなして上述の方法を用いて測定した。その結果も第2表の中に含まれている。さらにその中には、現在は一見して天然の孔からの噴出のように見えても、実際は古い噴気井の腐ってしまったものから噴出しているものもかなりあるようである。

第2表に含まれていない噴気孔、噴気地からの噴出量と噴出熱量は、測定されたものにくらべて僅かであると思われたので、ここでは取上げられなかった。第2表の結果を集計すると、第3表のようになって、結局、噴気井による噴出量は、23.4kg/sec、放出熱量は 3.8×10^8 cal/sec であり、そのうち 11.7kg/sec、 2.2×10^8 cal/sec が温泉造成用に利用されており、他は大気中に放出されている。

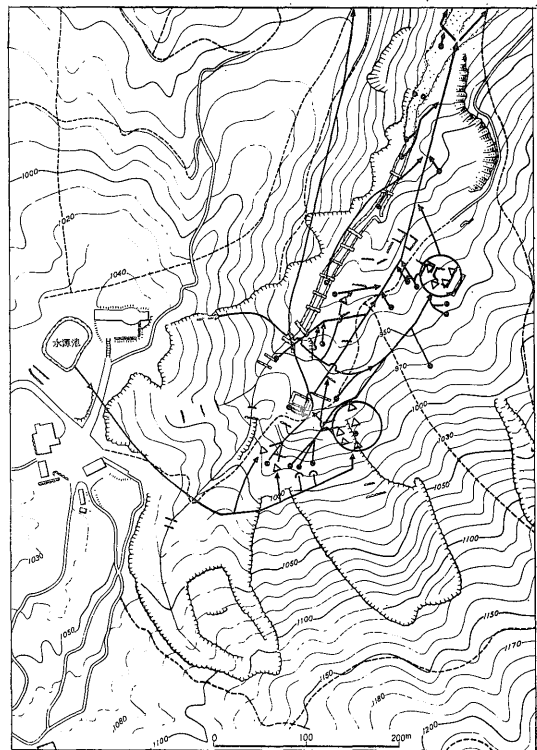
3.2 温泉による放熱

次に、大涌谷の諸所に湧出している温泉は、木管や土

管で集められ、水道水と噴気で造成された温泉と一緒に強羅や仙石原方面へ送られている。第10図は温泉湧出口の位置と配管の模様であって、このような複雑な配管状況に加えて、それらの構造上、1つ1つの温泉についての測定が不可能であったので、全体として次のような計算を行なった。

$$\begin{aligned}
 (\text{温泉の湧出量}) &= (\text{大涌谷の出口での送湯量}) - (\text{水道水の補給量}) - (\text{加熱用噴気量}) \\
 &= 41.7 \times 10^8 - 11.2 \times 10^8 - 10.1 \times 10^8 \\
 &= 20.4 \times 10^8 \text{ g/day}
 \end{aligned}$$

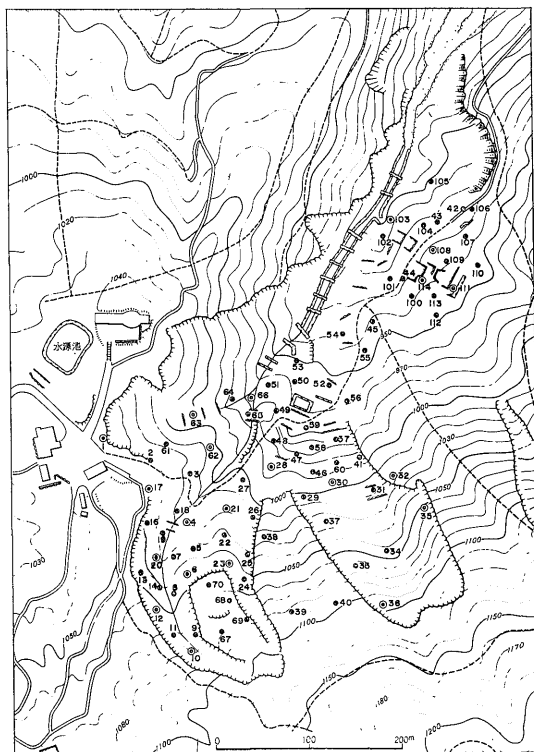
$$\begin{aligned}
 (\text{温泉による放熱量}) &= (\text{送湯熱量}) - (\text{補給水熱量}) - (\text{加熱用噴気熱量}) \\
 &= 28.5 \times 10^{10} - 1.1 \times 10^{10} - 18.7 \times 10^{10} \\
 &= 8.7 \times 10^{10} \text{ cal/day}
 \end{aligned}$$



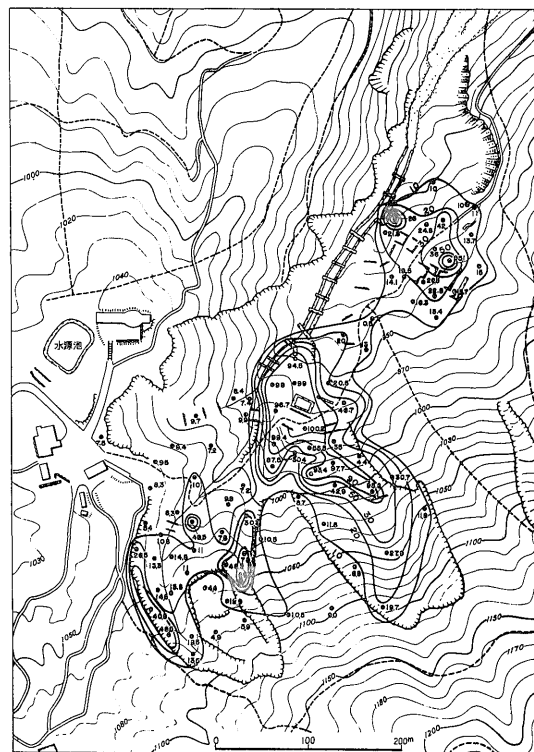
第10図 大涌谷の温泉(・)、噴気による温泉造成(△)と配管の概略(→)

第4表 大涌谷における0.5m深と1m深の地中温度

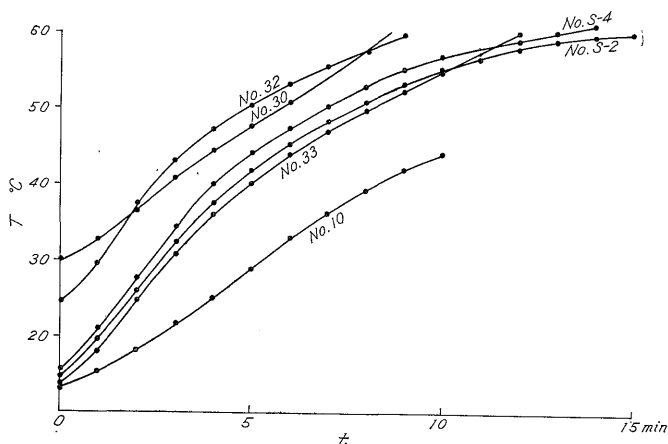
測点 No.	地中温度 °C		測点 No.	地中温度 °C		測点 No.	地中温度 °C		測点 No.	地中温度 °C	
	0.5m	1.0m		0.5m	1.0m		0.5m	1.0m		0.5m	1.0m
1	5.0	7.5	23	42.8	46.3	45	10.5	10.5	67	5.9	4.9
2	7.5	9.5	24	48.3	69.3	46	71.4	93.4	68	9.9	12.9
3	9.0	10.0	25	53.3	78.3	47	20.4	30.4	69	6.4	5.9
4	36.5	48.5	26	20.3	30.3	48	95.4	99.4	70	5.4	4.4
5	9.5	11.0	27	7.2	7.2	49	96.9	96.7	100	15.4	16.3
6	9.5	11.0	28	74.5	87.5	50	99.3	99.0	101	13.0	14.1
7	18.5	14.5	29	4.2	8.7	51	100.5	98.0	102	13.8	21.8
8	11.0	13.5	30	24.4	42.9	52	15.5	20.5	103	94.9	95.0
9	11.0	18.5	31	95.0	95.8	53	71.5	94.5	104	17.0	24.8
10	9.5	13.5	32	25.7	30.7	54	10.5	20.0	105	10.0	10.0
11	18.5	48.5	33	8.8	11.8	55	15.5	13.0	106	10.0	11.0
12	29.5	40.5	34	20.9	27.9	56	30.8	46.7	107	11.9	13.7
13	36.5	45.5	35	6.5	6.5	57	31.5	35.0	108	30.1	36.0
14	11.5	14.5	36	14.2	19.7	58	41.5	55.5	109	95.1	95.1
15	20.5	26.5	37	10.3	11.8	59	97.0	100.2	110	13.8	15.0
16	12.4	8.4	38	9.0	10.5	60	96.6	97.7	111	12.6	15.7
17	8.3	8.3	39	7.0	10.5	61	8.0	9.4	112	12.3	15.4
18	8.3	8.3	40	10.0	9.0	62	7.9	7.2	113	17.0	22.5
19	8.3	10.8	41	30.0	44.0	63	7.5	9.7	114	19.4	26.5
20	9.3	13.3	42	10.0	10.0	64	7.3	8.4			
21	8.3	9.8	43	30.0	42.0	65	6.9	9.9			
22	4.3	7.8	44	16.0	19.5	66	6.4	7.4			



第11図 大涌谷における地中温度測定点(・)と熱伝導率測定点(●)



第12図 大涌谷における1m深地中温度分布(°C)



第13図 熱伝導測定用発熱棒の温度(T)と時間(t)との関係の例

第5表 大涌谷における熱伝導率と熱流量

No.	1m 深地中温度 (°C)	0.75m 深地温勾配 (°C/cm)	熱伝導率 ($10^{-8} \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}}$)	熱流量 ($10^{-6} \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}}$)	備考
1	7.5	0.05	0.27	13.5	
4	48.5	0.24	0.21	50.4	
6	11.0	0.03	0.25	7.5	弱粘化帯
10	13.5	0.06	0.21	12.6	弱粘化帯
12	40.5	0.22	0.23	50.6	弱粘化帯
17	8.3	0.00	0.18	0.0	強粘化帯
20	13.3	0.06	0.26	15.6	強粘化帯
21	9.8	0.03	0.26	7.8	
23	46.3	0.07	0.43	30.1	強粘化帯
28	87.5	0.26	0.33	85.8	
30	42.9	0.37	0.20	74.0	
32	30.7	0.10	0.46	46.0	
33	11.8	0.06	0.24	14.4	
36	19.7	0.11	2.13	234.3	多雨の後 (平均値の計) (算より除外)
62	7.2	0.01	0.30	3.0	
63	9.7	0.04	0.29	9.6	
66	7.4	0.02	0.23	4.6	
103	95.0	0.002	0.79	1.6	少雨の後
108	36.0	0.12	0.65	78.0	少雨の後
111	15.7	0.06	0.22	13.2	
114	26.5	0.14	0.23	32.2	
平均			0.31		
乾燥土壌			0.33		
砂			0.78		
凝灰岩			1.7		

$$\left(\frac{\text{温泉の平均}}{\text{均泉温}}\right) = \left(\frac{\text{温泉による放熱量}}{\text{沸出量}}\right) = \frac{870}{20.4} = 42.7^\circ\text{C}$$

0°Cを基準にしたものである。

以上の数値は昭和41年3月の箱根温泉供給株式会社の資料と筆者らの測定値にもとづくものであり、熱量は

3.3 土地の熱伝導による放熱

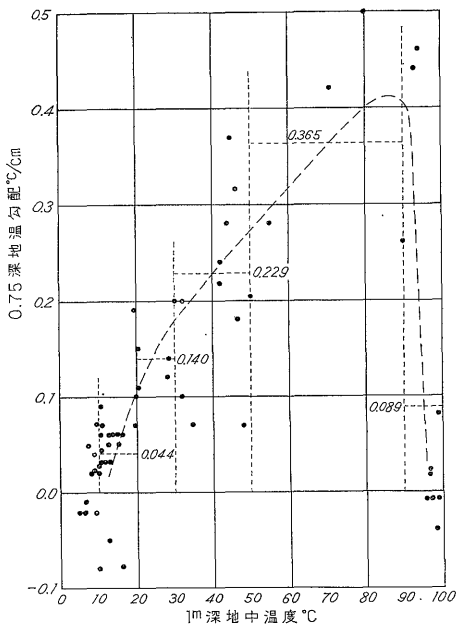
地熱地域からは、噴気や温泉によって運び出される以

外に、伝導的に熱の放散がある。その量を知るためには、その地域内の地中温度勾配と熱伝導率を測定すればよい。第11図に示した約80地点で深さ1mと0.5mの地中温度を測定した結果が第4表であって、それから1m深の地中温度分布を描いたものが第12図である。また21地点で非定常測定法(梶原, 1960)によって深さ1mまでの表土の平均熱伝導率を測定した。第13図はその際に地中に埋めた発熱棒の温度と時間の関係の1例である。第5表は熱伝導率の測定結果と、地温勾配から求めたその場所での熱流量である。熱伝導率は平均して 0.31×10^{-8} cal/cm·sec·°Cで、この値は岩石の値よりはずっと小さいが、乾燥土壌の値として知られている 0.33×10^{-8} cal/cm·sec·°Cにほぼ等しい。

を求め、熱伝導率をすべて一様に平均値 0.31×10^{-8} cal/cm·sec·°Cとして熱流量を計算し、それに等温線間の面積を乗じて放熱量を求めたのが第6表である。この結果、大涌谷からの熱伝導による放熱量は 2.4×10^4 cal/secという値が得られた。

3.4 地中温度と変質帯との関係

大涌谷のA地区では、藤井他(1966)によって変質帯の詳細な調査が行なわれ、弱変質帯、弱粘化帯、強粘化帯、珪化帯、滑性化帯に分類されている。これらの変質帯の生成は必ずしも現在の地熱の作用によるものではないので、変質帯と噴気や温泉の分布あるいは地中温度分布との間に厳密な対応性が認められないことは当然である。しかし、第15図に示したように、少なくとも、滑性化帯



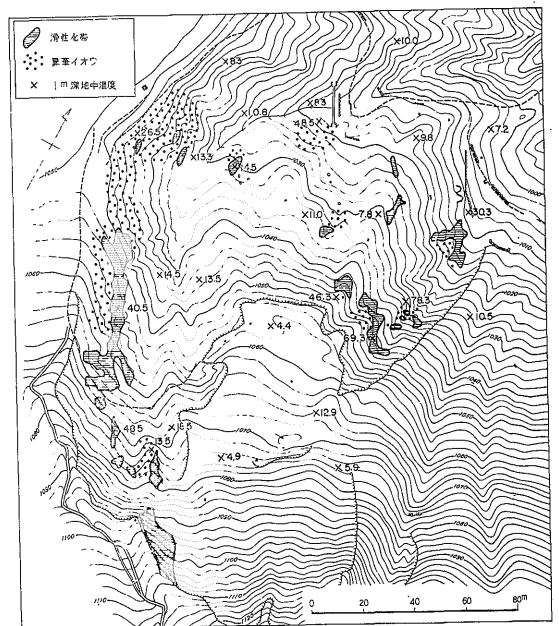
第14図 1m深地中温度と0.75m深の地温勾配との関係

大涌谷全域(G地区を除く)で、地下の異常熱源から、熱伝導によって放出されている熱量を推算するために次のようにした。第14図のように、1m深の地中温度と0.75m深での地温勾配との関係を求めてみると、大勢としては、地中温度が高い所ほど地温勾配も大きいことがわかる。しかし点のばらつきは大きく、また地中温度が100°Cに近いところでは、地温勾配は逆に小さくなって、中には0.5m深よりも1m深の方が地中温度が低くなっているところさえある。それでおおまかな方法として、第12図の等温線の間隔に対応して、地中温度が、10.0~19.9°C、20.0~29.9°C、30.0~49.9°C、50.0~89.9°C、90.0°C以上の所のそれぞれの平均地温勾配

第6表 大涌谷における熱伝導による放熱量

1m深地中温度 (°C)	地温勾配 (°C/cm)	熱流量 (cal/cm ² ·sec)	面積 (cm ²)	放熱量 (cal/sec)
10.0~19.9	0.044	1.364×10^{-5}	290.0×10^6	3955.6
20.0~29.9	0.140	4.340	167.5	7269.5
30.0~49.9	0.229	7.099	96.5	6850.5
50.0~89.9	0.365	11.315	48.5	5487.8
90.0以上	0.089	2.573	31.0	797.6
計			633.5	24361.0

(実測表層熱伝導率 平均 0.31×10^{-8} cal/cm·sec·°C)

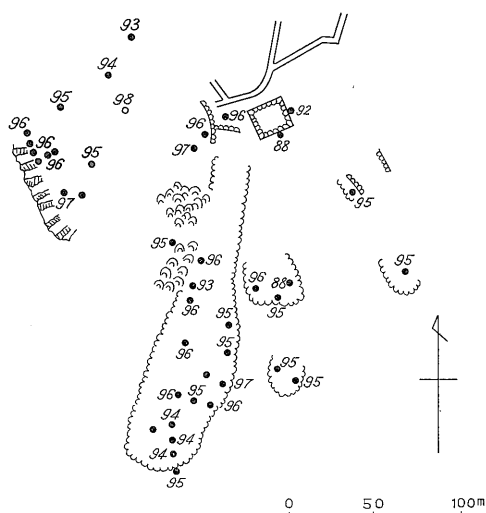


第15図 大涌谷A地区の1m深地中温度と滑性化帯、異華イオウの分布

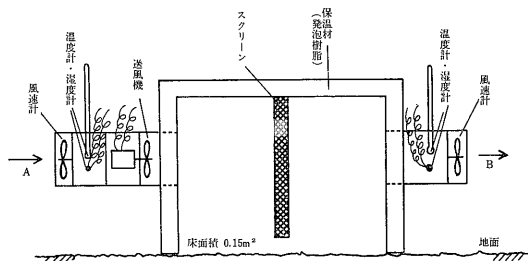
や昇華イオウの存在する場所での地中温度は高く、滑性化帯が現在の噴気作用によって生成されたという考えに都合がよい。

4. 大涌谷G地区からの放熱量

大涌谷G地区は大涌谷の他の地区の南東方高所にあるが、地形的に流域を異にし、そこに降った雨は大涌沢のほうに流れずに姥子のほうに流れる。この地区には掘さくされた噴気井はないが、そのかわり、大涌谷の他の地区にくらべて勢の強い噴気孔が多い。これらは第16図に示したように分布しているが、形状が不規則でしかもつ



第16図 大涌谷G地区の噴気孔分布と噴気温度(°C)



第17図 地熱熱量計

み重なった岩塊の間などから噴出しているので、測定の大困難なものが多い。したがって、この地区からの放熱量の概略の値を推定するために次のような方法を用いた。

まず、視察によって噴気の強さをA, B, Cの3階級にわけ、それらの中で大きさがほぼ同程度で、比較的測定に便なもの放熱量を地熱熱量計を用いて測定した。地熱熱量計は原理的には第17図のような装置で、筆者の

1人竹内によって試作されたものを用いた。すなわち、噴気地に底のない箱をかぶせ、Aより空気を入れ、Bより空気と噴気の混合物を強制的に排気する。単位時間に入る空気の体積を V_1 、密度を σ_1 、温度を t_1 、絶対温度を σw_1 、出るときのそれらを V_2 、 σ_2 、 t_2 、 σw_2 とし、出入を等圧変化と考えて空気の定圧比熱を C_p とすると、単位時間に熱量計の底からはいる熱量 Q は、温度 t_1 、 t_2 のときの水蒸気のエンタルピーを i_1 、 i_2 とかいて、

$$Q = V_2 \sigma_2 C_p t_2 - V_1 \sigma_1 C_p t_1 + V_2 \sigma w_2 i_2 - V_1 \sigma w_1 i_1 \quad (11)$$

質量の連続から $V_1 \sigma_1 = V_2 \sigma_2$ 、また噴気の流入にくらべて空気の出入を十分大きくしてやると、近似的に $V_2 \approx V_1$ とできるので、(11)式は

$$Q = V_1 \sigma_1 C_p (t_2 - t_1) + V_1 (\sigma w_2 i_2 - \sigma w_1 i_1) \quad (12)$$

となる。また底から熱量計に入る水蒸気の質量 m は

$$m = V_1 (\sigma w_2 - \sigma w_1) \quad (13)$$

ここに、 σw は温度 t に対する飽和水蒸気圧を f_m 、相対湿度を F とかくと

$$\sigma w = \frac{289.4 F f_m}{t + 273}, \text{ g/m}^3 \quad (14)$$

であらわされる。

第7表は地熱熱量計による測定結果である。これより階級Aの放熱量は $10,000 \text{ cal}/0.15 \text{ m}^2 \cdot \text{sec}$ 、Bは $5,000 \text{ cal}/0.15 \text{ m}^2 \cdot \text{sec}$ 、Cは $1,000 \text{ cal}/0.15 \text{ m}^2 \cdot \text{sec}$ とした。次に噴気孔、噴気地の面積の大きなものはその面積を概算し、それにもとずいて1, 5, 10という3種の拡がり係数を乗じた。第8表は大涌谷G地区の噴気孔について温度、強さ、拡がり係数を示したものである。

以上のような方法によって概算した噴気孔の放熱量を合計すると、 485 kcal/sec となり、これよりこの地区の噴気孔による放熱量を概略 $0.5 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ とした。

噴出水量は地熱熱量計からも計算できるが、第7表に示したものはいずれも乾いた噴気地の測定であって、これを拡張して全体の値を推定するのは不適當と思われた。それで、大涌谷G地区とG地区以外の地区で噴出水量と放熱量の割合が変わらないものと仮定し、G地区以外の大涌谷の大気放出噴気井の噴出水量が 11.7 kg/sec で放熱量が $1.66 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ であったことから、G地区の噴出水量を $11.7 \times 0.5 \div 1.66 = 3.5 \text{ kg/sec}$ とした。

噴気以外に温泉もごく僅か湧出しているが、その量は全体で 15 l/min 、平均泉温 50°C 程度である。

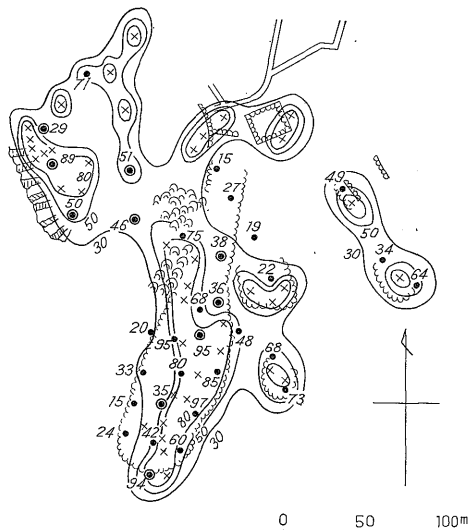
この地区でも、地中温度(第9表)、熱伝導率(第10表)が測定された。第18図は 1 m 深の地中温度分布である。

第7表 地熱熱量計による測定結果

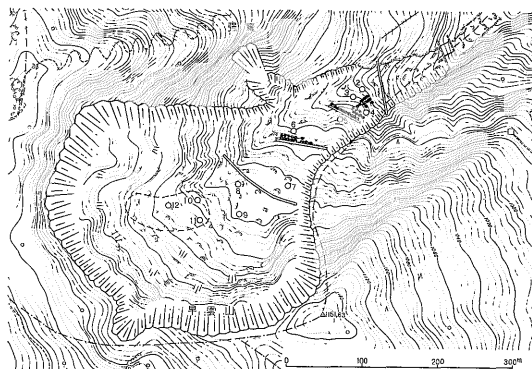
No.	温度	強さ	放熱量 ($\frac{\text{cal}}{\text{sec} \cdot 0.15\text{m}^2}$)	噴出量 ($\frac{\text{g}}{\text{sec} \cdot 0.15\text{m}^2}$)
1	97	B	7300	11
3	96	C	1300	1.7
11	98	A	10600	14.2
27	96	C	1100	1.6

第8表 大涌谷G地区の噴気孔

No.	温度 (°C)	強さ	拡がり 係数	No.	温度 (°C)	強さ	拡がり 係数
1	97	B	1	22	96	C	1
2	96	C	1	23	97	B	5
3	96	C	1	24	97	B	5
4	95	C	1	25	96	C	1
5	96	C	1	26	95	C	5
6	96	C	1	27	96	C	1
7	97	C	1	28	93	C	10
8	96	C	1	29	96	A	10
9	95	C	1	30	95	A	5
10	95	C	1	31	95	C	1
11	98	A	1	32	95	C	1
12	94	C	1	33	88	C	1
13	93	C	1	34	95	C	1
14	95	C	1	35	96	B	10
15	94	C	1	36	95	C	1
16	94	C	1	37	95	C	5
17	94	C	5	38	88	C	1
18	94	B	5	39	92	C	1
19	97	A	5	40	97	A	1
20	96	B	10	41	96	A	1
21	96	C	1	42	96	B	5



第16図 大涌谷G地区の1m深地中温度分布(°C)



第19図 早雲山の噴気井(●)と噴気地帯(破線), ○は地中温度測定点

熱伝導率は平均して $0.36 \times 10^{-8} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ であった。1m深地中温度と0.75m深の地温勾配との関係も大涌谷の他の地区と大同小異であった。これらの資料から、前と同様の方法で、この地区からの熱伝導による放

熱量は $1 \times 10^4 \text{ cal/sec}$ 程度と推算された。

5. 早雲山からの放熱量

ここに早雲山というのは、須沢の谷頭にある長さ約

第9表 大涌谷G地区における0.5m深と1m深の地中温度

測点 No.	地中温度 (°C)		測点 No.	地中温度 (°C)		測点 No.	地中温度 (°C)		測点 No.	地中温度 (°C)	
	0.5m	1.0m		0.5m	1.0m		0.5m	1.0m		0.5m	1.0m
2	17.0	29.0	22	25.0	36.0	35	13.0	15.0	51	23.0	49.0
4	81.0	89.0	23	16.0	21.5	36	43.0	60.0	53	20.0	27.0
11	34.0	49.8	24	14.0	19.0	37	45.0	42.0	54	28.0	34.0
13	45.5	71.0	28	34.0	47.5	38	20.0	24.0	56	40.0	64.0
14	30.0	51.0	29	95.0	95.0	39	94.0	—	57	51.0	67.5
15	24.0	46.0	30	95.8	95.0	40	63.0	85.0	58	55.0	73.0
17	63.0	75.0	31	17.0	20.0	41	58.0	80.0			
19	24.0	37.5	32	89.5	97.0	42	27.0	33.0			
21	48.0	68.0	34	30.0	35.0	50	12.0	15.0			

地質調査所月報(第20巻第2号)

第10表 大涌谷G地区における熱伝導率と熱流量

No.	1m 深 地温 (°C)	0.75m での地 温勾配 (°C/cm)	熱伝導率 ($10^{-8} \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}}$)	熱流量 ($10^{-6} \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}}$)
2	29.0	0.24	0.29	69.5
4	89.0	0.16	0.43	68.8
11	49.8	0.32	0.27	86.4
14	51.0	0.42	0.36	151.2
15	46.0	0.43	0.31	133.3
19	37.5	0.27	0.35	94.5
22	36	0.22	0.32	70.4
29	95	0.00	0.52	0.0
34	35.0	0.10	0.36	36.0
平均			0.36	

t/day 造成していた。いま、エンタルピー i_x の水道水 $x \text{ kg/day}$ が、エンタルピー i_y の噴気 $y \text{ kg/day}$ と混合して上の温泉水が造られていると考えると、

$$x + y = 770 \times 10^3 \quad \text{kg/day} \quad (15)$$

$$xi_x + yi_y = 770 \times 82 \times 10^3 \quad \text{kcal/day} \quad (16)$$

という関係式が成立する。ここに i_x は水温 14°C より約 14 kcal/kg である。いっぽう、 i_y は噴気密度あるいは湿度がわからなければ決まらないが、構造上測定不可能であったので、第2表の大涌谷の噴気井の資料から $90 \sim 99^\circ\text{C}$ のものの平均を求め、その値 0.0123 g/cm^3 と、実測噴気温度 96°C から $i_y = 117 \text{ kcal/kg}$ とした。これらの数値を用いると、(15)、(16)式から $x = 263 \text{ t/day}$ 、 $y = 507 \text{ t/day}$ 、噴気による放熱量 $yi_y = 5.9 \times 10^{10} \text{ cal/day}$ が得ら

第11表 早雲山ボーリング資料(小田原土木事務所による)

No.	掘さく年月	方位	傾斜角	深さ (m)	上部孔径 (mm)	下部孔径 (mm)	蒸気層深さ (m)	孔口温度 (°C)
1	37.1	N15°E	—	62	127	76	56.5~59.0	96
2	37.1	N30E	—	70	127	76	57.2~64.2	96
3	37.1	N10E	—	65	127	76	58.5	96.2
4	36.12	N20E	—	61	127	76	52.3	96
5	37.10	NS	30°	75	127	76	17 ~75	103
6	37.11	N89S	30	75	127	76	7.6~75	99
7	37.11	NS	30	75	127	76	14.7~70.3	100
9	38.10	NS	—	85	127	76	20.5~85	
10	38.11	NS	—	85	127	76	35 ~85	
11	38.12	NS	—	85	127	76	53 ~	
12	39.1	NS	—	85	127	76	20 ~33	
13	39.10	N8W	45	85	127	76	61.5~83	
14	39.10	N5W	45	85	127	76	4.0~	97
15	39.11	N10W	45	85	127	76	9 ~	98
16	40.10	—	45	50	115	65	3.1~	
17	40.12	—	45	50	115	65	4.1~	
18	41.10	—	—	53	115	76	14.8~	
19	42.9	—	—	56.3	115	76	8.4~	

500m幅約300mにおよぶ大規模な崩壊地で、地形は急峻で、周囲の崩落崖には不安定な岩塊が懸垂して、常に落石の危険にさらされている。また急傾斜の地表には、過去における落石が累々と積み重なって足場はきわめて悪い。以上のような状況のため、この地区では十分な測定が行えなかったが若干の測定結果とその他の資料から、この地区の放熱量と噴出水量について次のように考察を行なった。

早雲山の噴気地帯はA、B、Cの3つのグループに分けられる(第19図)。一番下のAグループには22本の噴気井があって、第11表はそれらの掘さく時の資料である。それらはすべて温泉造成用に利用されていて、昭和41年3月5日には、水道水と噴気を混合して 82°C の湯を770

第12表 早雲山における0.5m深、1m深地中温度と熱伝導率

測点 No.	地中温度		熱伝導率 ($10^{-8} \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}}$)
	0.5m	1.0m	
2	14.5	19.0	0.52×10^{-8}
3	11.0	12.0	
4	13.5	15.0	0.87×10^{-8}
5	12.5	12.5	
6	36.0	55.0	
7	12.0	14.5	
8	12.5	10.0	
9	34.5	51.0	
10	11.0	12.5	
11	10.5	11.0	
12	95.3	96.1	

れる。

Bグループには14本の噴気井があって大気中に噴気を放出している。ここでは、噴気井が危険な所にあることと測定器の不調のため測定が行なえなかったの、簡単に噴気井の本数に比例するとして、Aグループの値に14/22を乗じたものを、湧出水量と放熱量の推定値とした。

Cグループは最上段にある自然噴気地である。ここでは、第12表にあげたように、地中温度、土地熱伝導率などの若干の測定が行なわれたが、全体の放熱量を算出するだけの資料は得られなかった。やむをえず、A、Bグループあるいは大涌谷との対比から、大まかに、湧出水量 2kg/sec, 放熱量 0.2×10^8 cal/sec と推定した。

6. 大涌谷・早雲山地域からの噴出水量と放熱量

大涌谷および早雲山の下流には、それぞれ姥子・上湯・強羅の諸温泉があって、それらはいずれも上流の地熱地域に熱源があることがわかっているの、それらを含めて、大涌谷・早雲山地域からの噴出水量・放熱量を表にしたのが第13表である。

結局、大涌谷・早雲山地域からは、噴出水量合計 129

第13表 大涌谷・早雲山地域からの噴出水量と放熱量

地 域		噴出水量 (kg/sec)	放出熱量 (0°C基準) (10^6 cal/sec)
大涌谷 (A~F地区)	噴気孔	—	—
	噴気井(大気放出)	11.7	1.66
	噴気井(温泉造成)	11.7	2.16
	温泉	23.7	1.01
	熱伝導	—	0.02
上湯温泉		1.2	0.06
小計		48.3	4.91
大涌谷G地区	噴気孔	(3.5)	(0.5)
	温泉	0.3	0.01
	熱伝導	—	0.01
姥子温泉		26.8	1.24
小計		30.6	1.76
早雲山	噴気孔	(2.)	(0.2)
	噴気井(大気放出)	3.8	0.43
	噴気井(温泉造成)	5.9	0.68
	熱伝導	—	—
強羅温泉		37.9	2.66
小計		49.6	3.97
全 域	噴気孔と噴気井	38.6	5.63
	温泉	89.9	4.98
	熱伝導	—	0.03
	合計	128.5	10.64

第14表 地熱地帯の放熱量の測定例

地 域	基準温度	放 熱 量 (10^6 cal/sec)	報 告 者
アトサヌブリ	10	7.8	福富 (1966)
登別地獄谷	—	11.2	"
大涌谷と早雲山	0	10.6	
	10	9.3	
St. Lucia (西印度諸島)	24	8.6	Robson et al. (1955)
Dominica (西印度諸島)	24	17	"
St. Vincent (西印度諸島)	24	18	"
Steamboat (Nevada)	10	11.8	White (1968)

kg/sec, 放熱量 10.64×10^8 cal/sec (0°C基準) ということになる。このような噴気地域を含む地熱地帯の放熱量が測定された例はまだあまり多くはないけれども、第14表に2・3の例を示した。これよりみれば、大涌谷・早雲山地域は登別などと同程度であって、普通の地熱地域ではこの程度の放熱量を持ったものが多い。

次に、大涌谷・早雲山地域の放熱量を erg であらわすと、 1×10^{22} erg/year となる。火山爆発のエネルギーは1回に $10^{30} \sim 10^{37}$ erg といわれているから、噴気活動によって1年間に放出されるエネルギーは中規模の爆発が毎年1回あることに相当する。

日本の火山活動によるエネルギーの放出量は、Sugimura 他 (1963) によると、平均して 7×10^{23} erg/year といわれている。いっぽう、日本には大涌谷・早雲山程度の地熱地域は20数個所存在するので、それらをあわせると日本の地熱地域からの放熱量は大略 2×10^{23} erg/year となる。さらに普通の温泉の湧出量を村井 (1966) の統計によって 991, 831 l/min, 平均泉温を松永 (1956) の統計から計算して 52°C とすると、温泉の湧出によって運び出される熱量は 1.1×10^{24} erg/year である。また、火山・温泉地域以外の日本全土から放出される熱量は、平均熱流量を 1.5×10^6 cal/sec·cm² とし、面積を 370, 000 km² とすると 7.3×10^{24} erg/year と概算される。以上の結果を一括したものが第15表である。(2)と(3), (3)と(4)

第15表 日本全土からの放出エネルギー
(地震によるものを除く)

種 別	放出エネルギー (erg/year)
(1) 普通の土地の熱流量として	7.3×10^{24}
(2) 火山活動により	0.7×10^{24}
(3) 地熱地域から	0.2×10^{24}
(4) 普通の温泉の湧出により	1.1×10^{24}
合 計	9.3×10^{24}

(昭和41年4月~42年5月調査)

の間には多少の重複があると思われるし、(1)の算出に用いた面積の中には(2), (3), (4)の地域も含まれている。したがって日本全土から1年間に放出されるエネルギーは、地震によるものを除いて約 9×10^{24} erg/year ということになる。

参考文献

- 安藤 武・大久保太治(1966) : 試錐結果からみた大涌谷変質帯の内部構造と変質機構について, 防災科学技術総合研究報告, no. 7, p. 19~39
- 福富孝治・他5名(1966) : 北海道アトサヌプリ噴気孔の地球物理学的研究, 北海道大学地球物理学研究報告, no. 16, p. 61~81
- 藤井紀之・他4名(1966) : 箱根大涌谷変質帯の産状および性質, 防災科学技術総合研究報告, no. 7, p. 7~18
- 梶原昌弘(1960) : 表土1mの平均熱伝導率測定, 北海道大学地球物理学研究報告, no. 7, p. 31~36
- 松永信夫(1956) : わが国温泉の統計的概況(2), 温泉研究, no. 7, p. 20~26
- 村井秀夫(1966) : わが国温泉地の実態(その2), 温泉工学会誌, vol. 4, no. 2, p. 105~122
- 大木靖衛・他5名(1968) : 箱根強羅温泉の温度異常上昇とその水理地質学的考察, 神奈川県温泉研究所報告, no. 6, p. 1~20
- ROBSON, G. R.・WILLMORE, P. L.(1955) : Some heat measurement in West Indian soufriers, *Bull. Volcanologique*, vol. 17, p. 13~39.
- SUGIMURA, A. et al.(1963) : Quantitative distribution of late Cenozoic volcanic materials in Japan, *Bull. Volcanologique*, vol. 26, p. 125~140.
- 高橋 清・他2名(1966) : 箱根大涌谷の噴気ガスの特性, 防災科学技術総合研究報告, no. 8, p. 13~19
- WHITE, D.E.(1968) : Hydrology, Activity, and Heat Flow of the Steamboat Springs Thermal System, Washoe County Nevada, *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 458-C.
- 湯原浩三・他4名(1966) : 箱根強羅温泉の水理的熱的構造と大涌谷地熱地帯との関連性, 防災科学技術総合研究報告, no. 8, p. 29~42
- 湯原浩三(1967) : 天然蒸気の密度測定, 地質ニュース, no. 159, p. 1~6