

吾妻北部地域放熱量調査報告

関 岡 満*

Total Heat Discharge from Northern Azuma Geothermal Area

Mitsuru SEKIOKA

Abstract

Visual surface manifestation of geothermal activity in northern Azuma geothermal area is centralized mainly to the both cliffs along the River Maekawa at Ubayu spa in the south-eastern part of this area. In Ubayu spa area, geothermal heat is transferred (1) by hot springs self-flowing from the east-side cliff and from the bottom of the River Maekawa and (2) in vapor and by conduction through the both cliffs.

In October 1973, a measurement was carried out to determine the total heat discharge from this geothermal area, forming a part of the Geothermal Basic Survey. Heat transferred convectively from self-flowing springs is evaluated to 1.15×10^6 cal/sec, while heat transferred through high-gradient near-surface ground is estimated 6.01×10^4 cal/sec from the surface temperature field based on the heat budget method. Moreover, convective heat transferred from 'Eight spa of Azuma' other than Ubayu spa is found 2.60×10^6 cal/sec.

Thus total heat discharge is determined 3.81×10^6 cal/sec from northern Azuma geothermal area.

1. 緒 言

山形県の南東部には、西吾妻山を主峯として、海拔1,900 m 以上の数個の高山をもつ吾妻火山群が存在する。福島県との県境には、東鉢山、西大巖、西吾妻山、人形石山、東大巖、烏帽子山、家形山を結ぶ尾根がほぼ東西方向に約12 km にわたって連なっている。この尾根の北側である山形県側には、東から五色・新五色・滑川・姥湯・吾妻・大平・白布高湯・新白布高湯などの吾妻八湯と呼ばれる温泉が存在し、地熱地域を形成している(第1図参照)。これが全国地熱基礎調査の昭和48年度における放熱量調査地域の一つとなった吾妻北地域である。

この地域では、顕著な熱水変質帯が薬師森南麓にある姥湯温泉の前川上流両岸に見られ、ここでは石英凝灰岩壁の亀裂から温泉が自然湧出している。吾妻北部全地域からの放熱量を推測するために、上記各温泉からの温泉湧出によるもの、姥湯変質帯からの伝導熱流量および対流による放熱量を調査の対象とした。

この報告では、2.で温泉湧出による放熱量を、姥湯以外の温泉については、既存の資料を用いて算出し、姥湯については、変質帯および河川底からの湧出を実測して

求めた。3.で、姥湯は変質帯からの伝導熱流量を非定常熱伝導棒方式を用いて測定し、また、4.では、伝導および対流による全放熱量を、最近開発された赤外線放射温度計による地表面温度測定値から熱収支方程式を用いて全放熱量を推測する方法を用いて求めた。

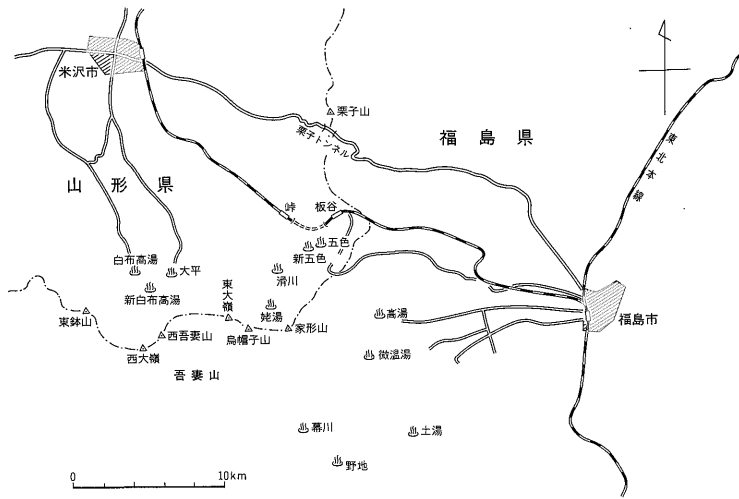
姥湯地区の調査は昭和48年10月7日-13日に大手開発株式会社によって行われた。

本調査に対し、種々御援助を頂いた山形県商工課長大串貞二氏を始め同課の清水貞雄・横山英夫氏および自然保護課の東海林辰雄氏に厚く御礼申し上げる。また、種々御助言を頂いた地質調査所地殻熱探査課長馬場健三・国立防災科学技術センター情報処理室長湯原浩三両博士に深く感謝の意を表する。

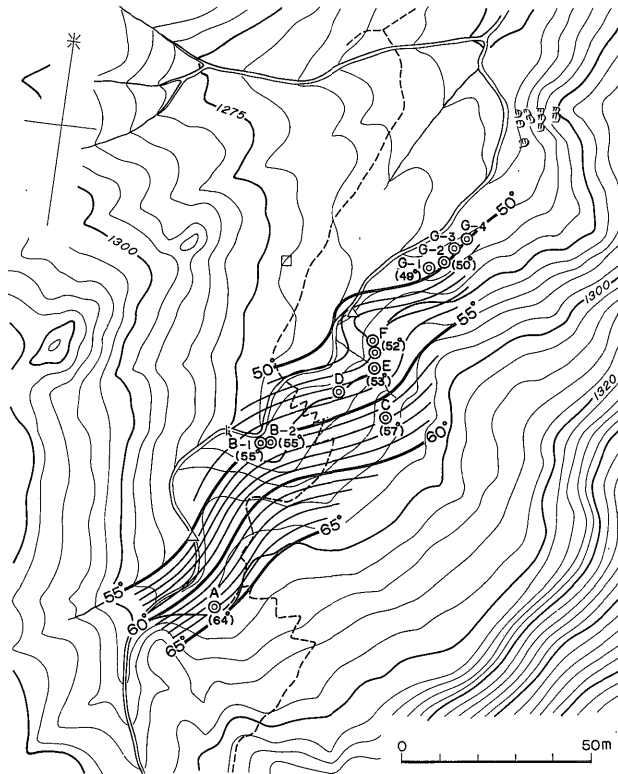
2. 姥湯地区の概況

姥湯温泉は前川の源流地にあり、標高は1,230 m である。北西に1,538 m の薬師森、南東に1,621 m の大日岳がそびえ、その間に浸食した前川の源流が流れ、温泉は、右岸に沿った断崖に露出する石英凝灰岩の亀裂および川底から自然湧出している。両岸は平均勾配7/10程度の急斜面で、温泉が湧出している右岸の下部は南北約150 m、東西約50 m の熱水変質帯を呈している。左岸は、地熱徴候は全くなく、変質帯の規模は右岸と同程度

* 防衛大学校, 当所併任



第1図 西香妻地区温泉位置図



第2図 泉温分布図 (自然湧出)

であるが、所々に樹木が群生している。

3. 温泉による放熱流調査

3.1 姥湯地区

姥湯地区の温泉が輸送する熱量を、東斜面、旅館使用および前川の河川底からの3つの部分にわけて求めた。

東斜面では第2図A—Gで温泉が自然湧出している。これらの湧出量と泉温は第1表(a)のとおりであり、平均気温2.3℃に対して計算された放熱量は445.4×10⁸ cal/secである。なお、温泉の温度は高所ほど高温になっている。この地域では、上記の温泉は東西両斜面間の谷を流れる前川源流に自然流入している。

この他、第2図東斜面E・F付近の崖の裂け目から湧出している温泉の一部を木樋で、前川に沿って約150m下流にある升形屋旅館まで引湯し、使用後前川へ放流している。旅館使用温泉に対する放熱量については木樋内の流速と水温を測定して第1表(b)に示すように、平均気温2.3℃に対して128.0×10⁸ cal/secの値を得た。

また、第2図に△で示された位置付近では川底から温泉が湧出している。この他、西側斜面(第2図の□印付

第1表(a) 姥湯東斜面における自然湧出泉源の温度・湧出量および温泉からの対流放熱量

位置	泉温 deg C	湧出量 cm ³ /sec	放熱量* cal/sec
A	64	450	27.8×10 ⁸
B-1	55	766	40.4
B-2	55	2,000	105.4
C	57	383	21.0
D	55	160	8.4
E	53	3,000	152.1
F	52	200	9.9
G-1	49	700	32.7
G-2	50	400	19.1
G-3	50	300	14.3
G-4	50	300	14.3
	平均53.6	8,659	4.45×10 ⁸

* 放熱量は平均気温2.3℃に対する値である。

第1表(b) 姥湯における河川底湧出および旅館使用泉源の温度・湧出量および対流放熱量

位置	泉温 deg C	湧出量 cm ³ /sec	放熱量 cal/sec
旅館使用泉源	53.0	4,300	2.18×10 ⁸
河川底	53.6	9,500	4.87×10 ⁸

近)から、この小河川へ流入する伏流水がある。

河川底から湧出する温泉による放熱量を求めるために、上記諸量の測定値を用いて、次の計算を行った。

◎河川上流A地点 流量 Q₁ = 39,600 cm³/sec

(上段滝の上) 温度 θ₁ = 10.3℃

◎河川へ流入する温泉 流量 Q_s = 8,600 cm³/sec

(第1表(a)参照) 温度 θ_s = 53.6℃

◎旅館引湯B地点 流量 Q_T = 4,300 cm³/sec

(旅館使用湯樋) 温度 θ_T = 53.0℃

◎河川底湧出温泉 流量 Q_H = ?

温度 θ_H = 53.6℃*

(*東斜面平均温度と等しいと仮定)

◎西側斜面伏流水 流量 Q_w = ?

温度 θ_w = 19.0℃

◎河川下流C地点 流量 Q₂ = 214,000 cm³/sec

(姥湯温泉宿舎下流 温度 θ₂ = 21.0℃

約80m)

以上より、流量に対して、

$$Q_2 = Q_1 + Q_s + Q_T + Q_H + Q_w \quad (1)$$

0℃基準の熱量に対して、

$$Q_2 \theta_2 = Q_1 \theta_1 + Q_s \theta_s + Q_T \theta_T + Q_H \theta_H + Q_w \theta_w \quad (2)$$

(1)と(2)式に上記の数値を代入して、計算すると、

$$Q_H = 9,500 \text{ cm}^3/\text{sec}$$

$$Q_w = 152,000 \text{ cm}^3/\text{sec}$$

を得る。したがって、θ_HとQ_Hの値を用いると河川底から湧出する温泉による放熱量は、平均気温2.3℃に対して、第1表(b)に見られるように487.4×10⁸ cal/secとな

第2表 吾妻北地区における温泉放熱量

温泉名	泉温 deg C	湧出量 cm ³ /sec	放熱量* cal/sec	
五色1号泉	42.3	618	23.4×10 ⁸	(4.4)
" 2 "	41.8	309	11.6	(4.4)
新五色	40.5	1,215	44.0	(4.3)
滑川上ノ湯	53.9	2,385	117.6	(4.6)
" 下ノ湯	44.5	1,332	53.1	(4.6)
吾妻	58.7	692	38.2	(3.5)
大平	53.7	640	32.3	(3.3)
白布高湯1号泉	61.0	15,810	896.4	(4.3)
" 2 "	59.7	17,340	960.6	(4.3)
" 3 "	57.8	5,550	296.9	(4.3)
新白布高湯	56.2	2,400	128.4	(2.7)
			2.60×10 ⁸	

* 放熱量は()内の年平均気温に対して計算した。

注) 姥湯地域の値は1.15×10⁸ cal/secである(本文参照)。

った。

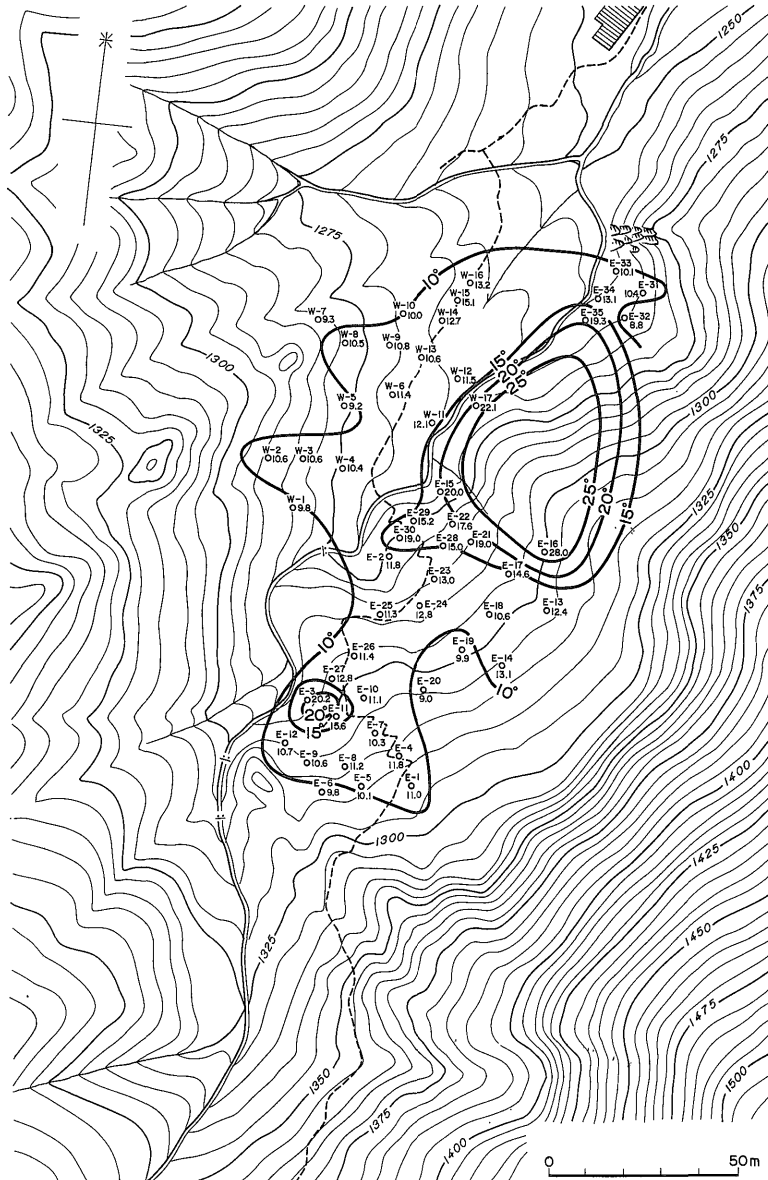
上記の 3 部分の放熱量を合計すると、姥湯地域の温泉による放熱量として、 1.15×10^6 cal/sec を得る。

3.2 姥湯を除く吾妻北地域

吾妻北地区には、姥湯の他に五色、新五色、滑川、吾妻、大平、白布高湯、新白布高湯などの温泉が存在する。これらの各温泉では、顕著な熱水変質帯・自然噴気などは見られない。これらの温泉からの湧出による全放熱量を、各地の年平均気温に対して、山形県衛生部の資

料により計算した。年平均気温は、標高 850 m の滑川温泉における観測値 4.6°C のみが入手できたので、これを基準にし、五色 (標高 850 m)、新五色 (820 m)、吾妻 (1,040 m)、大平 (1,060 m)、白布高湯 (800 m)、新白布高湯 (1,160 m) における値として、平均気温減率 $0.6^\circ\text{C}/100$ m を用いて計算した。これらの値は第 2 表の各地の放熱量の後の () 内に示した。

結局、姥湯を除く各温泉の湧出による全放熱量は 2.60×10^6 cal/sec となる。これに姥湯の値 1.15×10^6 cal/sec



第 3 図 地温分布図 (0.5 m 深)

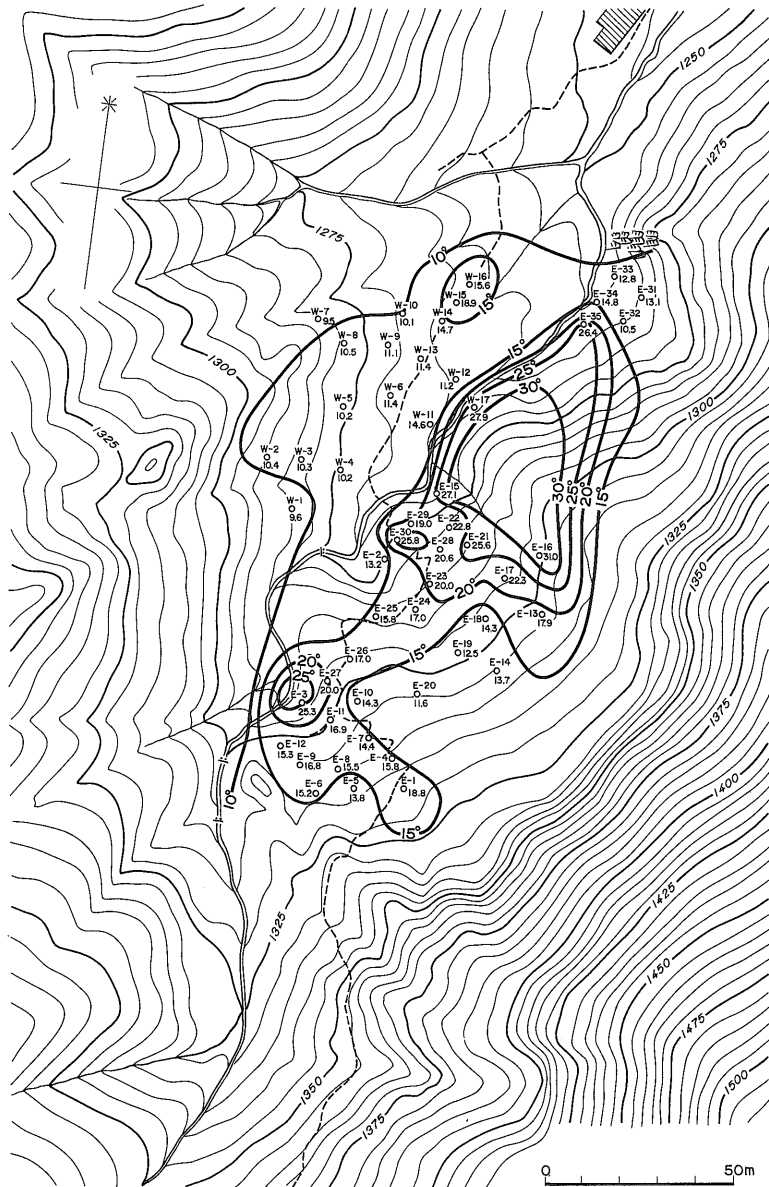
を加えると、吾妻北地域の温泉湧出による放熱量の総計は 3.75×10^8 cal/sec に達する。

4. 伝導による放熱量

姥湯変質帯の東側斜面 160m×60m に34個、西側斜面 90m×50m に17個の測定点を選び、この51点について、それぞれ、0.5mおよび1.0m深の地温を測定し、結果を第3図および第4図に、それぞれ示した。

第3表は非定常熱伝導棒を用いて測定した熱伝導率の

値であり、6個の測定点の位置を第5図に示した。この表と図から、東側斜面の値は低く、平均値は 0.26×10^{-3} cal/cm sec deg であり、一方、西側斜面の平均値は 0.91×10^{-3} cal/cm sec deg と高く、明確な差が見られる。前者は岩石の値よりはずっと小さいが、土壤の値として知られている 0.33×10^{-3} cal/cm sec にはほぼ等しいと見てよい。一方、後者は、測定地点が川岸に近く、岩石や砂の多い所であるためのものと考えられる。このため東側斜面に対しては平均値 0.26×10^{-3} cal/cm sec を用いるが、



第4図 地温分布図(1.0m深)

第 3 表 姥湯の熱伝導率

測 点*	熱 伝 導 率 cal/cm sec deg
1	0.380×10^{-3}
2	0.230
3	0.233
4	0.180
<hr/>	
平均 (東側斜面)	0.26×10^{-3}
5	0.925
6	0.825
<hr/>	
平均 (西側斜面)	0.91×10^{-3}

* 測点位置は第 6 図参照

西斜面上方でもこの値を適用し、 0.91×10^{-3} cal/cm sec deg の値は第 4 図に点線で示した西側の中央下部の岩石・砂の部分にのみ適用することとした。

姥湯地域において、地下の異常熱源のために、熱伝導によって放出される熱量を推測するために、湯原ほか (1969) による次のような近似的方法を用いた。第 6 図に示したように、縦軸に 0.5m と 1m 深地温から求めた

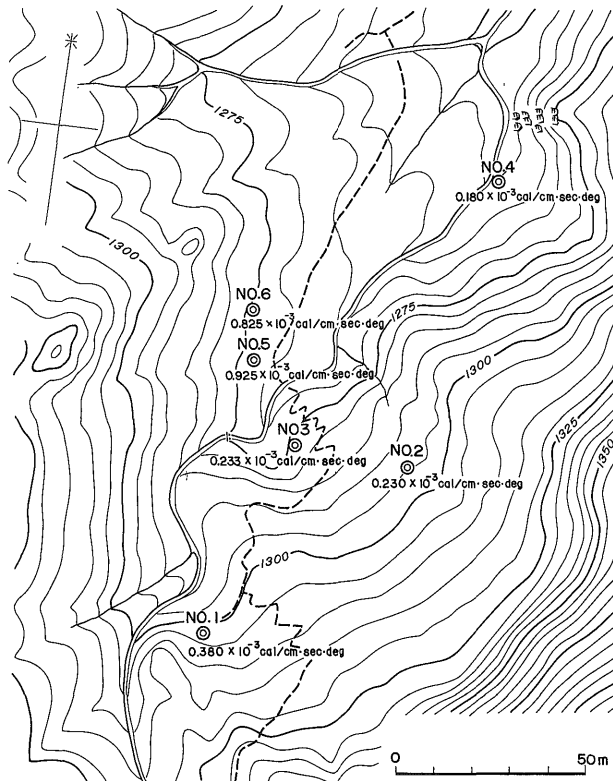
0.75m 深地温勾配を、横軸に 1m 深地温をとり、両者の関係を求めた。次に第 5 図の等温線の温度間隔に対応する平均地温勾配を求め、上述の熱伝導率を乗じて熱流量を計算し、それに等温線間の面積を乗じて放熱量を算出した。これを第 4 表に示した。この表の西側斜面の中央下部では前述のように熱伝導率 0.91×10^{-3} cal/cm sec deg を、それ以外では東側斜面と同じ 0.26×10^{-3} cal/cm sec deg の値を用いた。この結果、姥湯地域からの熱伝導による放熱量として、 2.4×10^8 cal/sec が得られた。

5. 赤外線放射温度計による放熱量調査

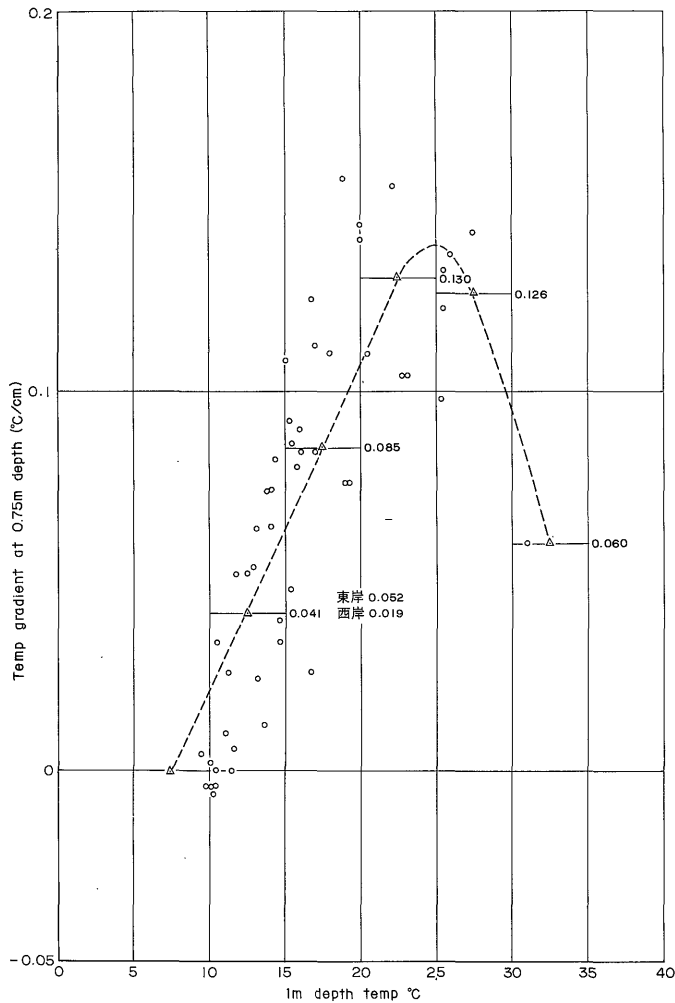
この方法は、地熱地域における地表面に対する熱収支方程式から、近接した 2 地点間の地熱放熱量の差をこれら 2 地点における地表面温度差で表わす式を導き、この式に赤外線放射温度計によって測定した値を用いて、放熱量を推測するものである (SEKIOKA and YUHARA, 1974)。

この方法によると、任意の時刻における地表面温度差 $\Delta\theta$ を用いて、

$$\Delta G = e(1-0.09m)(0.52+0.65\sqrt{e_w})\sigma\Delta T_0^4 + \rho_a C_p D(1+r)\Delta\theta_0 \quad (3)$$



第 5 図 熱伝導率測定位置図



第6図 姥湯温泉の1m深地中温度と0.75mでの地温勾配との関係

という関係が得られ、放熱量差 ΔG は、(3)式に示されたように、放射率 e 、雲量 m 、水蒸気圧 e_w 、地表面温度 T_0 ($^{\circ}\text{K}$) と θ_0 ($^{\circ}\text{C}$)、空気密度 ρ_a 、外部拡散係数 D および σ は Stefan-Boltzmann 定数で、 C_p は空気の定圧比熱である。Bowen 比 $1/r$ を与えることにより求められる。

(3)式において必要な同時地表面温度分布を測定するためには時定数の小さい赤外線放射温度計が便利であり、松下通信工業株式会社製のナショナル赤外線放射温度計 ER-2002 (第7図) を用いた。これは軽量 (本体1.6kg) で小型 (本体 $90 \times 115 \times 182\text{mm}$) でポータブル型で、特に、地熱地域のような足場の悪い所での野外観測に適している。さらに、これは充電式乾電池 (Ni-Cd) を内蔵して、電源なしに連続8時間程度の観測が可能である点も特徴となっている。この放射温度計の性能を第5

表に示しておく。

第5表から見られるように、この放射温度計の応答波長域は $9-12 \mu\text{m}$ であり、水蒸気および炭酸ガスの吸収波長帯に対する“大気窓”領域と一致する。また、この波長域は地熱地域特有の硫化水素ガスに対してもほとんど透明である。このため、通常の条件下ではセンサと目標との距離が30m以下ならば、水蒸気の影響を無視できる (KIMURA and MISAWA, 1970)。しかしながら、噴気孔からの湿り蒸気および霧は、これらがほぼ完全黒体と見なされるので、測定時の大きな障害となる。

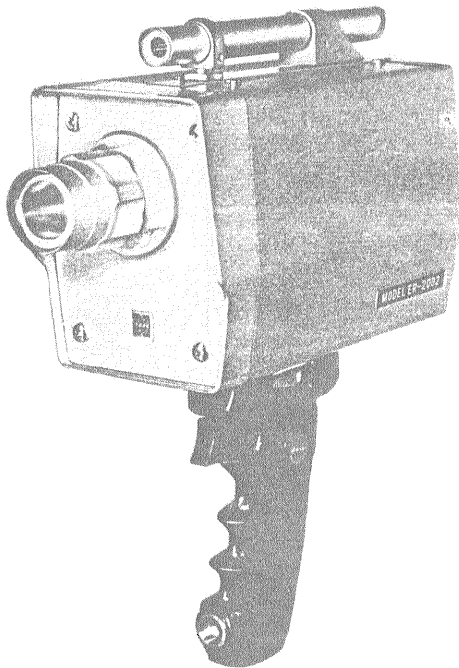
(3)式で与えられる相対放熱量 ΔG を絶対量で表わすためには、基準値を定めなくてはならない。対象とする地熱地域内で、外見上地熱徴候がなく、かつ、地表面温度が最低の点を基準点と考え、その点における G の値を0

第4表 姥湯地域の熱伝導による放熱量

1 m 深地温 deg C	平均地温勾配 deg/cm	熱伝導率 cal/cm sec deg	熱流量 cal/cm ² sec	面積 cm ²	放熱量 cal/sec
(東側斜面)					
10 ~ 15	0.052	0.26×10^{-3}	1.352×10^{-5}	$4,648 \times 10^4$	628
15 ~ 20	0.085	0.26	2.210	2,556	565
20 ~ 25	0.130	0.26	3.380	1,184	400
25 ~ 30	0.126	0.26	3.276	896	294
30 ~ 35	0.060	0.26	1.560	944	147
(西側斜面)					
10 ~ 15	0.019	{ 0.26 0.91	0.494×10^{-5} 1.729	$3,150 \times 10^4$ 692	156 120
15 ~ 20	0.085	{ 0.26 0.91	2.210 7.735	160 20	35 15
東側斜面放熱量 2,034 cal/sec 西側斜面放熱量 326 cal/sec 総放熱量 2,360 cal/sec					

第5表 ナショナル ER-2002 赤外線放射温度計の性能

測定温度範囲	0°C ~ 80°C -40°C ~ 120°C	} (切替)
感度 (記録用端子)	0.1°C 0.2°C	
測定速度	0.1秒 1秒	} (切替)
視野角	2度	
検出波長域	9 ~ 12 μm	
最大出力	8 V	
使用温度範囲	0°C ~ 50°C	



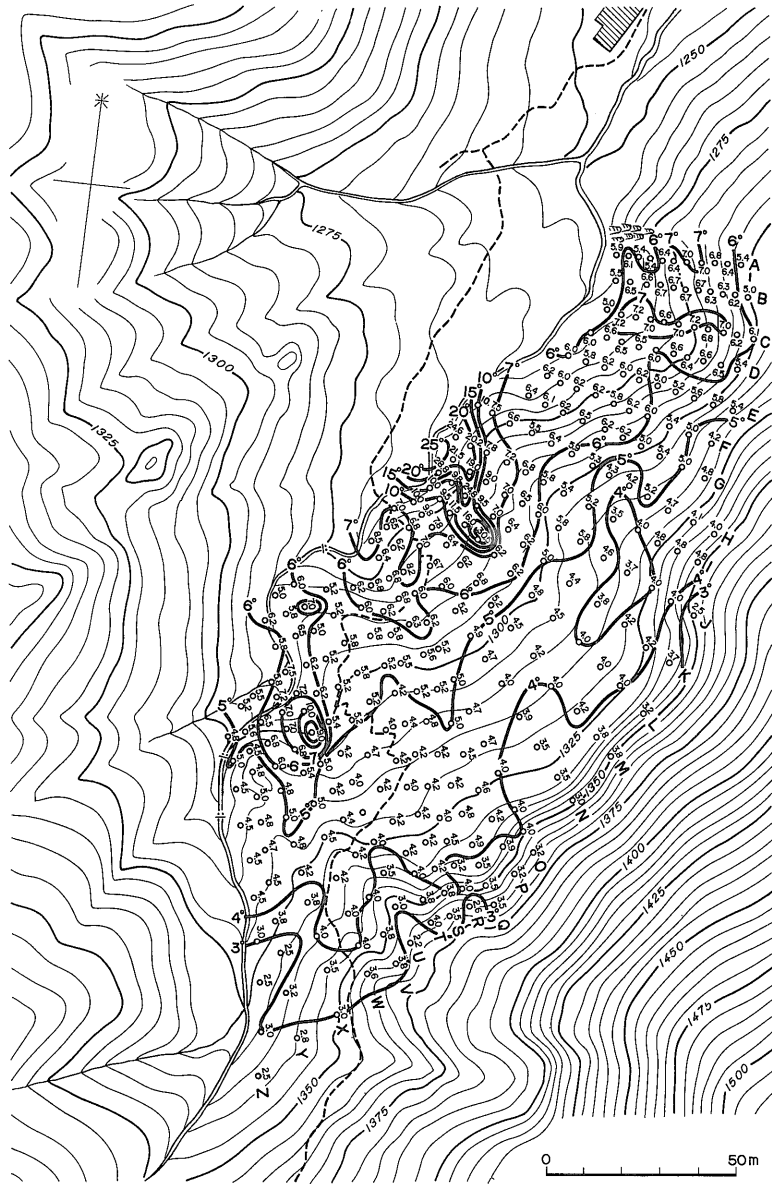
第7図 赤外線放射温度計
(ナショナル ER-2002)

とすることで、實際上、問題のないことが箱根・大涌谷観測の例で確かめられている (SEKIOKA and YUHARA, 1974).

姥湯地域における測定は東側斜面南北約150 m, 東西約50 mの傾斜約35°の斜面に対して行った。対向する西

側斜面中腹に3点を選び、そこに前述のナショナル赤外線放射温度計 ER-2002 を設置し、対象範囲を大体南北方向に50 mずつの3区域に分けて地表面温度の測定を行った。温度計設置点と各対象域中心との距離は約40 mであるので、対象域内各点との距離は30-67 mの範囲にある。この距離は前述の介在大気の影響を無視できる距離30 mよりは大きい、野外観測では適当な温度計設置点を選ぶのが困難であり、止むを得なかった。また、この放射温度計の視野角が2°であるので、対象面の傾斜を考慮に入ると、距離30 mの場合では長径111 cm, 短径104 cmの長円、距離67 mの場合では長径624 cm, 短径234 cmの長円内の平均地表面温度を測定することになる。したがって、距離が大きくなる斜面上方では温度測定の分解能は低下するが、この東側斜面の高温部は斜面下方に存在するので、大きい影響はないといえる。

測定した地表面温度分布を第8図に示す。(3)式を用い



第8図 赤外線放射温度計による測定結果等温泉図

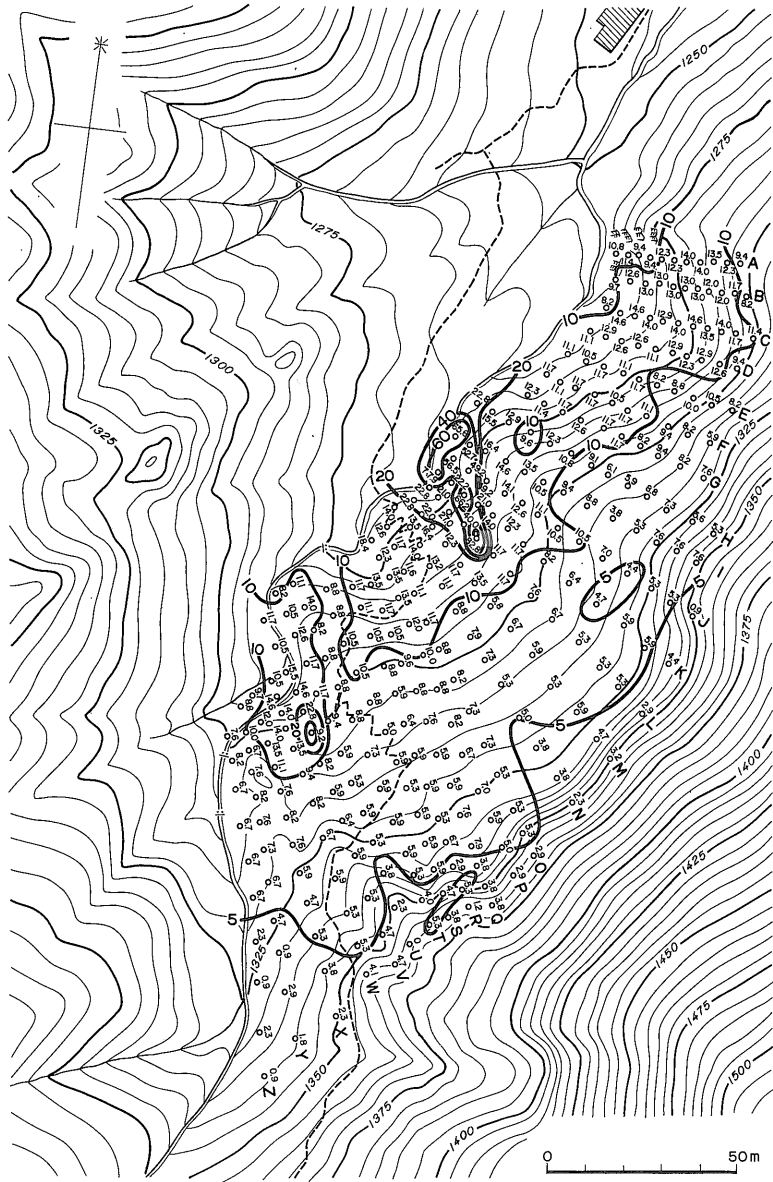
て放熱量を計算するため、この式に含まれている気象学的・物理学的パラメータを定める観測を SEKIOKA and YUHARA (1974) の示した方法で、地表面温度測定とともに行った。その結果、雲量 m は10、水蒸気圧 e_w は8.87 mb、空気密度 ρ_a は 1.07×10^{-3} gm/cm³、外部拡散係数 D は0.72 cm/sec、地表面放射率 e は0.985、ボウエン比逆数 r は0.5であった。放射率0.985は大涌谷の平均値0.95 (SEKIOKA and YUHARA, 1974) よりやや大きく、草津殺生河原における0.98 (湯原ほか, 1975) とほぼ等しい。

これらのパラメータおよび物理定数を代入し、 $\Delta T_0^4 \cong 8.14 \times 10^7 \Delta\theta_0$ の関係を用いると、(3)式は

$$\begin{aligned} \Delta G &= 0.985(1-0.9) (0.52+0.065\sqrt{8.87}) \times 1.36 \\ &\quad \times 10^{-2} \Delta T_0^4 + 1.07 \times 10^{-3} \times 0.239 \\ &\quad \times 0.72(1+0.5) \Delta\theta_0 \\ &\cong 2.840 \times 10^{-4} \Delta\theta_0 \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

対象域の最低温度は4℃であり、この等温線付近では地熱微候が外見上ないので、4℃を基準温度として、各



第9図 赤外線放射温度計による測定結果から求めた等熱流量線図

測点のGの値を(4)式を用いて計算した。このようにして求めた放熱量の分布を第9図に示す。

東斜面の伝導による熱流量は、前述のように湯原ほか(1969)の近似的算定法によって求めたので、第4図の1m深地温分布図と同じ分布をしていることになる。第4図と第9図を比較すると、地温測定点E-3、E-21およびE-30付近に見られる伝導による熱流量極大域は多少のずれはあるが、放射温度計による推測値の極大域に対応している。しかし、W-11地点の対岸付近では、伝導

による放熱量極大は見られないが、放射温度計による放熱量分布図では極大が現われている。この付近の斜面は傾斜が急で、かつ露岩であるため地温や熱伝導率測定のための穴を掘きすることができなかつた場所である。赤外線放射温度計による遠隔測定から放熱量を推測する方法は、このような状況に対しては、非常に有用であるということができよう。

放射温度計による方法で対象域内の全放熱量を算定するために、隣接する等温線の平均温度から基準温度(こ

第6表 姥湯における熱収支法を用いた放熱量

地表面温度 deg C	$\Delta\theta$ deg C	G cal/cm ² sec	面積 cm ²	放熱量 cal/sec
4-5	0.5	1.420×10^{-4}	$2,434 \times 10^4$	3.46×10^3
5-6	1.5	4.260	2,688	11.45
6-7	2.5	7.100	2,136	15.17
7-10	4.5	12.78	597	7.63
10-15	8.5	24.14	203	4.90
15-20	13.5	38.34	301	11.54
20-25	18.5	52.54	96	5.04
25-	21.0	59.64	16	0.95

総計 6.01×10^4

ここでは4℃)を差し引いて $\Delta\theta$ を定め、(4)式で求めた G の値に等温線間の面積を乗じて計算した(第6表参照)。等放熱量線より等温線の方の間隔が細かいので計算には後者を用いた。計算の過程を第6表に示した。この方法による全放熱量は 60×10^3 cal/secであり、伝導による全放熱量は 2×10^3 cal/secである、この差は、前述のように伝導による放熱量を測定できなかった場所の影響ももちろん含まれてはいるが、さらに、前者が伝導放熱量と対流放熱量の両者を含むためであり、これらの測定では対流によって運ばれる熱量が伝導によるものより、はるかに大きいことを示している。また、両者の比が約1:30となっているが、これは箱根大涌谷の例(関岡・湯原, 1970; SEKIOKA and YUHARA, 1974)とほぼ同じである。

6. 結 論

2.—5. で示した吾妻北地域における温泉による対流放熱量、伝導放熱量、赤外線放射温度計による表面放熱量は第7表に示されるようにそれぞれ 3.75×10^6 cal/sec, 2.4×10^3 cal/sec, 6.01×10^4 cal/secである。伝導による伝導放熱量は5.でも述べられたように赤外線放射温度計による測定値に含まれていると考えられるので、結局この地域からの全放熱量は $3.75 \times 10^6 + 6.01 \times 10^4 = 3.81 \times 10^6$ cal/secと結論でき、ほとんど大部分が温泉による対流放熱量である。

吾妻北地域を、FUKUTOMI (1961) による温泉地からの

第7表 吾妻北地域対熱量値

単位: cal/sec

	温泉対流放熱量	伝導放熱量	表面放熱量	合計
吾妻北(除姥湯)	2.60×10^6	—	—	2.60×10^6
姥湯	1.15×10^6	$(2.36 \times 10^3)^*$	6.01×10^4	1.21×10^6
計	3.75×10^6	$(2.36 \times 10^3)^*$	6.01×10^4	3.81×10^6

* () 内の数値については本文参照。

放熱量の熱階級で分類するために全放熱量を cal/min の単位で表わすと、 3.81×10^6 cal/sec = 2.29×10^8 cal/min であり、熱階級はIVである。

参 考 文 献

- FUKUTOMI, T. (1961) Rate of Discharge of Heat Energy from the Principal Hot Spring Localities in Hokkaido, Japan. *Jour. Faculty Science, Hokkaido Univ.*, S. VII, vol. 1.
- KIMURA, R. and MISAWA, N. (1970) Observation of Sea Surface Temperature by an Infrared Radiation Thermometer. *Jour. Oceanogr. Soc. Jap.*, vol. 26, p. 22-37.
- 関岡 満・湯原浩三 (1970) 積雪を利用して測定した箱根大涌谷の熱流量. *地熱*, no. 25, p. 22-27.
- SEKIOKA, M. and YUHARA, K. (1974) Heat Flux Estimation in Geothermal Areas Based on the Heat Balance of the Ground Surface. *Jour. Geophys. Resear.*, vol. 79, p. 2053-2058.
- 山形県衛生部 (1953) 山形県の温泉. 吾妻山系温泉群.
- 湯原浩三・大久保太治・竹内三郎 (1969) 箱根大涌谷・早雲山地熱地域からの放熱量. *地質調査所月報*, vol. 20, p. 83-100.
- (1975) 未公表.

(受付: 1976年4月8日; 受理: 1976年10月1日)