



Title	6. 北海道アトサヌプリ噴気孔の地球物理学的研究
Author(s)	福富, 孝治; FUKUTOMI, Takaharu; 須川, 明 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 16, 61-81
Issue Date	1966-08-10
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.16.61
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13918
Type	departmental bulletin paper
File Information	16_p61-81.pdf



6. 北海道アトサヌプリ噴気孔の 地球物理学的研究

福富孝治 ・ 須川 明* ・ 小林大二**
徳永英二*** ・ 和田昭夫** ・ 和気 徹
(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和 41 年 4 月受理 —

I. 序 言

昭和 38 年 11 月 19~21 日と昭和 39 年 3 月 16~18 日の 2 回に亘り、北海道川上郡弟子屈町字川湯のアトサヌプリ一帯の 1 m 深地温調査を行ない、噴気孔群についてその温度、蒸気量の測定を行なって、岩石伝いに地表から空气中へ逸出している熱量を推定し、噴気として空气中へ逸散している水蒸気総量と熱量およびアトサヌプリ全域から出ている総熱量の概値を推定した。さらに、これらの結果から地下における熱水の量、温度の推定を試みた。

II. 1 m 深地温調査

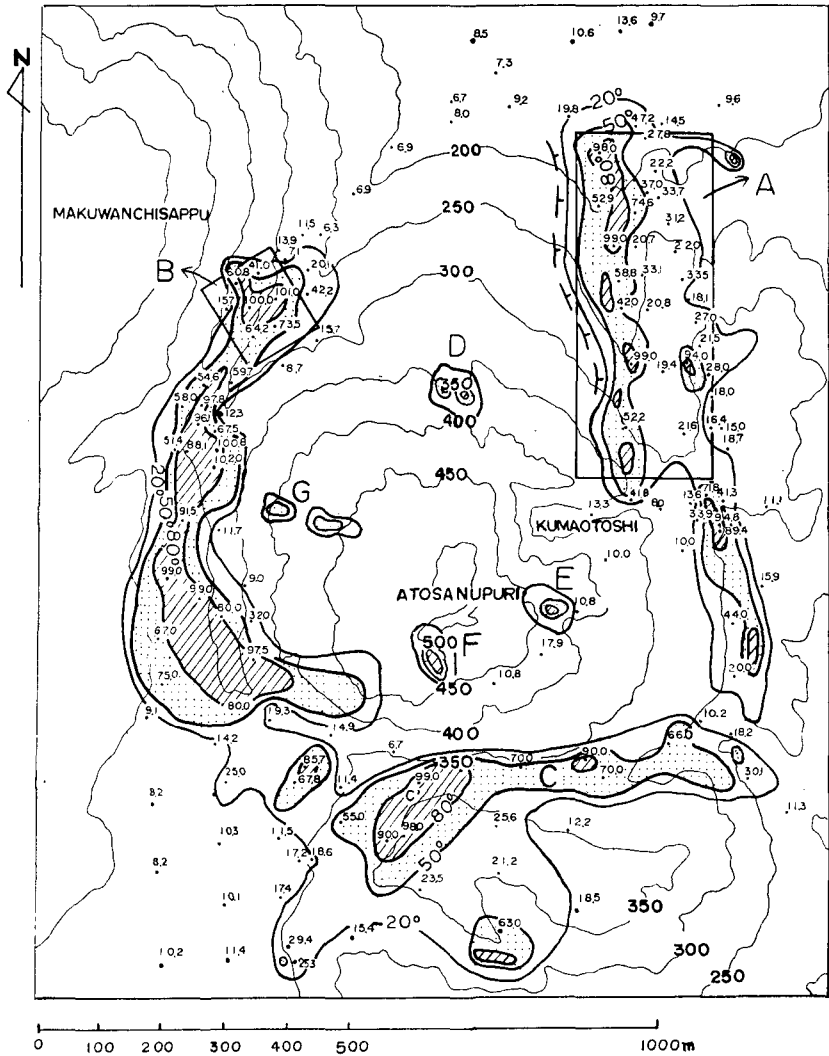
昭和 38 年 11 月 19~21 日アトサヌプリ付近の 138 点において 1 m 深地温を測定した。測定法については前報¹⁾と全く同様であるから省略する。第 1 図中、黒点は測点位置を示し、それにつけた数字は 1 m 深地温の値である。測定された 1 m 深地温は 7~100°C の広い範囲の値を示したが、熱源から充分離れた普通地温と思われる値は平均 8.1°C であった。地温が普通地温に近いところには這い松が繁茂しているのでこれらの分布をも参考にしながら、1 m 深地温の値から 20°, 50°, 80° の等地温線を引いた。第 1 図中太い線はこれを示す(細い線は地形の等高線である)。

1 m 深地温の主要な高温部は、図から判るように、アトサヌプリの東側、西側、南側の麓に沿って帯状に分布しているが、80°C 以上の地温を示す面積は夫々 $1.1 \times 10^4 \text{ m}^2$, $4.0 \times 10^4 \text{ m}^2$, $1.4 \times 10^4 \text{ m}^2$ で西側が特に大である。西側の B 高温帯はアトサヌプリとマクワンチサップとの谷に沿って谷のマクワンチサップ寄りに幅 50~200 m で S または SSW から N または NNE 方向へ凡そ 700 m の帯状をなして分布している。この高温帯中の南部地区には微小なものをのぞき噴気孔はないが、北部地区には比較的 1ヶ所にかたまって 10 数口の噴気孔群がある。

アトサヌプリ東側の A 高温帯は幅 50~200 m で北微西の方向に約 1 km 連っているが、詳細にみるとこの中に 2 帯の平行な最高温帯があり、山頂の東北東 200 m の熊落し爆裂火口の東口から北微西方向に点々として連らなっている最高温帯は顕著である。この最高温帯に沿って

現在 * 群馬大学教育学部, ** 北大低温科学研究所, *** 信州大学教育学部

1) 福富孝治; 1 m 深地温より温泉探査の可能性, 北大地球物理学研究報告, 1 (昭 26), 1.



第1図 アトサヌプリ付近の1m 深地温分布図

Fig. 1. High ground temperature zones (at a depth of 1m) around Atosanupuri dome.

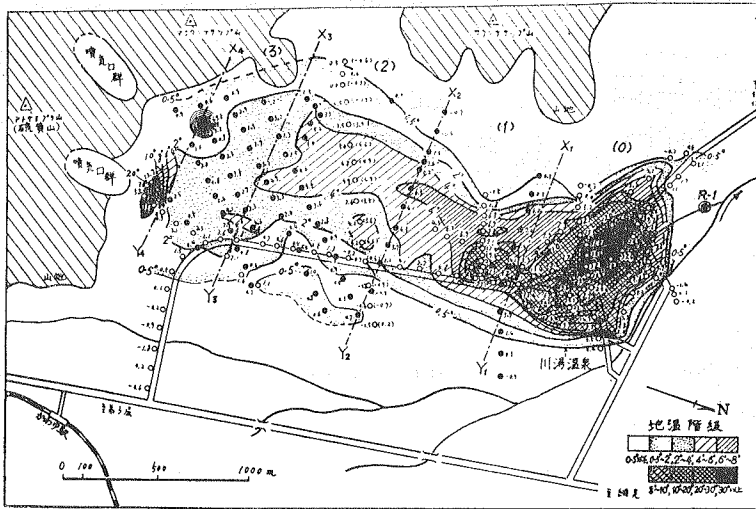
およそ50口の大小の噴気孔群が存在する。

これら A, B 両高温帯はアトサヌプリ北麓の平野部において、川湯温泉からアトサヌプリに向って延びている地温の高温帯²⁾(第2図)と結び付いていることは特記する必要がある。

アトサヌプリ南側の高温帯は幅50~150mで西から東へ約800mの帯状をなしているが、この高温帯には微小な噴気孔しか認められない。

これら A, B, C 高温帯は、地下からこの高温帯の延長方向に存在する裂罅伝いに上昇し

2) 福富孝治・須川 明・藤木忠美; 川湯温泉の地球物理学的研究, 北大地球物理学研究報告, 4 (昭31), 39.



第2図 川湯よりアトサヌプリ北側に至る中間地帯の1m深の地温分布 (白丸・黒丸は夫々昭和27年及び昭和30年の測点, 測点につけた数字は遠方の値を0とした地温の値)

Fig. 2. Horizontal distribution of ground temperature at a depth of 1m in an area between Kawayu hot springs and northern foot of Atosanupuri dome.

てきた噴気, 主として水蒸気の熱に原因していると思われる。

III. 高地温帯の地表から岩石伝いに空気中へ放出される熱エネルギー

アトサヌプリ周辺の高地温帯の地表から岩石伝いに熱伝導で空気中へ放出されている熱エネルギーを概算するため, まず第1図の20°, 50°, 80°Cの各地温等温線間の面積と80°以上の地温の面積 S_i を求め, 各等温線温度の中央値35°, 65°と90°をその各面積内の1m深平均温度 T_i とする。

1m深地温測定の際, 34測点では直ぐ付近において0.5mの地温を測定し, 0.5mと1.0mとの地温から深さ0.75mに対する地温垂直傾度を求め, この値とそれに対する1m深地温との関係を調べた。その結果を第3図に示した。一般に, 各温泉地におけるこれらの関係はかなりきれいな直線的関係³⁾であるが, アトサヌプリの場合には図のように点がかかなり散在している。玉川温泉その他の地熱地帯の地温についての清野の研究⁴⁾によれば, 地熱地帯の地表部では熱伝導のほかに, 水蒸気対流・凝結によって普通の土地とはかなり異なる地温垂直分布となっていることが判っている。アトサヌプリにおける第3図の点の散在はかような原因によるのであろう。しかし, ここでは一応熱伝導のみを考えて, 他の温泉地域同様直線的関係が成り立つ

3) 福富孝治; 1m深地温についての2, 3の問題, 北大地球物理学研究報告, 9 (昭37), 45.

4) 清野政明; 北大大学院博士課程論文 (昭和38年3月).

ものと仮定して第3図中に実線で示した直線を引き上記 T_i に対する 0.75 m の地温傾斜 g_i を推定した。但し、この地温傾斜はアトサヌプリ周辺の測定時における 1 m 深普通地温 8.1°C に対する地温傾斜 0.04°C/cm を差引いた値である。

岩石の熱伝導率 κ の値としては、川湯温泉調査⁵⁾の際採用した凝灰岩層の値 $1.7 \times 10^{-3} \text{ c} \cdot \text{g} \cdot \text{s}$ を用いたがアトサヌプリから 3 km 離れた電源開発株式会社の深さ 60~930 m の boring core について、西田・横山⁶⁾によって行なわれた熱伝導率の測定結果の平均値 $1.82 \times 10^{-3} \text{ c} \cdot \text{g} \cdot \text{s}$ ともかなり近い値であった。

岩石伝いに地表から単位時間に放出される熱エネルギー Q_2 は

$$Q_2 = \kappa \sum_{i=1}^n g_i S_i \quad (1)$$

によって計算した。但し、 S_i は第1図の各等地温線間の面積で、 g_i は S_i を限ぎる 2 つの等地温線の温度の中間値に対する温度傾斜である。この計算を第1表に示したが、熱伝導によってアトサヌプリ付近の高温帯の地表から放出される熱エネルギーの総量の概値として $2.0 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ すなわち $12 \times 10^7 \text{ cal/min}$ を得た。

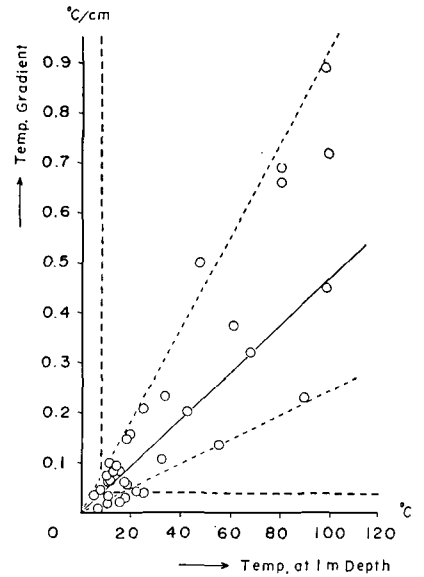
第1表 アトサヌプリにおける熱伝導により地表から流出する熱量

Table 1. Heat energy flowed out from ground surface in Atosanupuri due to heat conduction.

1 m 深地温の範囲 Ground temp. at 1 m depth (°C)	1 m 深の平均地温 Mean ground temp. at 1 m depth (°C)	面 Area 積 (cm ²)	温度勾配 Temp. gradient (°C/cm)	熱流量 Heat flow (cal/sec)
80~100	90	5.4×10^8	0.39	0.36×10^6
50~80	65	13.0×10^8	0.27	0.60×10^6
20~50	35	35.0×10^8	0.13	0.77×10^6
8~20	14	—	0.03	(0.26×10^6)
Total				$2.0 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ $(12 \times 10^7 \text{ cal/min})$

5) 前出 2)

6) 西田泰典・横山 泉；屈斜路カルデラ内のボーリング・コアの物理的諸性質について、北大地球物理学研究報告, 14 (昭40), 53.



第3図 地温勾配と同じ場所の1 m 深地温との関係

Fig. 3. Relation between temperature gradient at 0.75 m depth and the corresponding ground temperature at 1 m depth.

IV. 噴気孔の調査

II 章に述べたように、1 m 深地温の高温帯には大小の噴気孔が存在している。噴気孔の数の多いのは A 高温帯で凡そ 50 口の大小噴気孔があり、次は B 高温帯北部で 10 数口、C 高温帯には第 1 図中 C' 地区に微小噴気孔群がある。その他、山頂部に近い D 地区に中程度の噴気孔が 2 口、E, F, G 等に 1~2 の噴気孔が望見された。主に噴気孔の調査を行なったのは昭和 39 年 3 月 16~18 日であったので積雪が深く山頂部の噴気孔の調査は行なうことができなかったが、その数が少ないのでその影響は著しくないものと思われる。

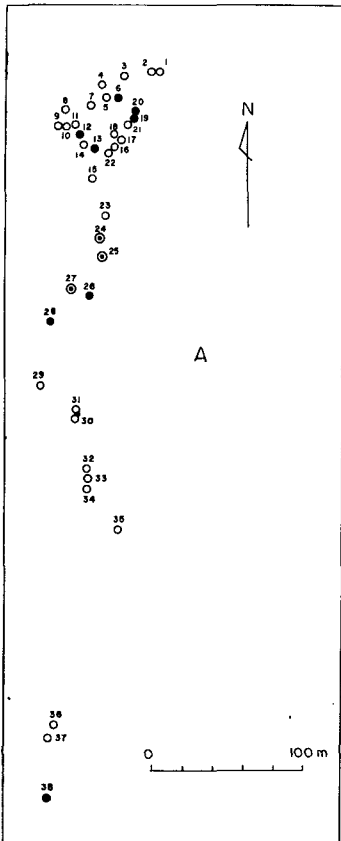
測定を行なったのは、アトサヌプリ東側の熊落し爆裂火口の東口から北へ延びた谷に沿って北麓の平野部までに帯状に配列している 50 口余の A 噴気孔群のうち微小なものを除いた 38 口と、西側の高温帯北部地区に存在する B 噴気孔群のうち微小なものを除いた 12 口についてである。第 4 図 (A 噴気孔群) および第 5 図 (B 噴気孔群) に測定した噴気孔の位置を示した。

図中の点につけた数字は噴気孔の測定番号である。

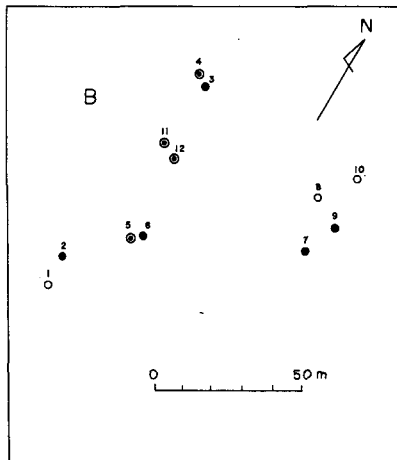
なお、第 4 図および第 5 図の外枠は第 1 図中 A および B に示した矩形の枠の拡大図である。写真 A, B, C, D には噴気孔を示した。

1. 噴気孔の温度

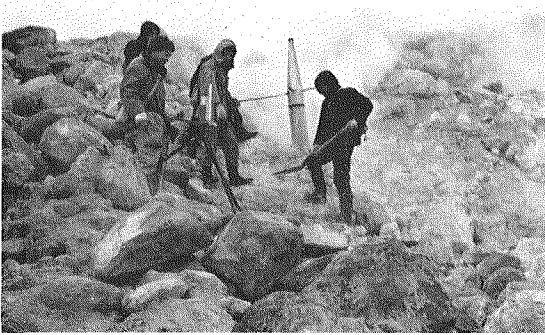
第 6 図は A, B 両地区の噴気孔の温度を横軸にとり、100°C を中心として温度を 2° 毎に区切って各温度範囲に属する噴気孔の数を縦軸にとり、その頻度分布を棒グラフで示したものである。ただし、斜



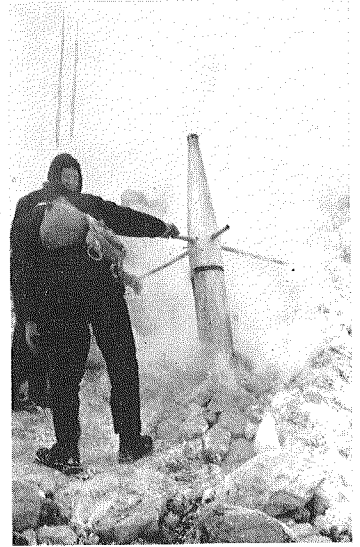
第 4 図 A 地区における噴気孔の分布
Fig. 4. Horizontal distribution of fumaroles in A area.



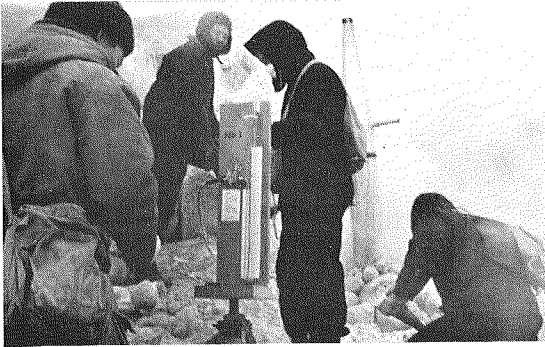
第 5 図 B 地区における噴気孔の分布
Fig. 5. Horizontal distribution of fumaroles in B area.



A



B



C

写真 A. A-7 噴気孔

Photo. A. No. 7 A fumarole.

写真 B. A-7 噴気孔 (近距離)

Photo. B. No 7 A fumarole.

写真 C. 蒸気量測定装置
(手前は圧力計)

Photo. C. Steam discharge
measuring device.

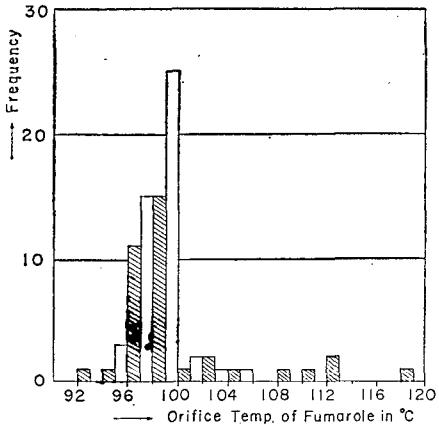


D

写真 D. A-27 噴気孔
(付近一帯は昇華硫黄)

Photo. D. No. 27 A fumarole
(The orifice is made from
sublimated sulphur).

線を施した部分は第1次調査の値、白色の部分は第2次調査の値である。図から判るように、噴気孔の温度は第1次調査の場合 $93^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり、それから約4ヵ月後の第2次調査(第2表参照)では $94^{\circ}\sim 104^{\circ}\text{C}$ と短期間にかかなり変化している。これは第2次調査の季節が第1次調査の場合に比べて気温が低く、高温帯の周辺には積雪があったことが影響していると思われる。しかし第1次、第2次調査を通じて $97^{\circ}\sim 99^{\circ}\text{C}$ のものが多く、全体の70%以上を占めている。噴気孔群の存在する土地の高度は $200\sim 350\text{ m}$ で、それに対する水の沸点は $99.4^{\circ}\sim 98.8^{\circ}\text{C}$ であるから噴気孔の多くは水の沸騰温度近くにあると言える。



第6図 噴気孔温度の頻度分布

Fig. 6. Frequency distribution of temperature of fumarole.

A地区の噴気孔群では長さ500mの帯状分布の北端から100~300mの範囲内の噴気孔が比較的高温であったが、第1次調査ではその中のNo. 25が最高温 118°C を示した。B地区では第1次調査でNo. 12が 112°C で最高であった。

アトサヌプリ噴気孔の温度は十勝岳、昭和新山等の活火山の火口付近に見られる噴気孔の温度に比較してかなり低いことは注意すべきであって、後にこの原因について論じたいと思う。

2. 噴気孔からの蒸気量の測定

アトサヌプリ噴気孔については昭和27年10月早瀬⁷⁾が2つの噴気孔について蒸気量を測定したものがあただけである。同氏の装置は円筒の下方をラップ状に拡げたもので、円筒の内部を小孔をあけた1枚の水平板で閉塞しその上下の圧力差をmanometerで読取るようにしたものである。

噴気孔の蒸気量測定法としては、ROBSONとWILLMORE⁸⁾が1955年に西印度諸島の噴気孔調査においてドラム管を横に半分に分けて、そのあいた口を噴気孔にかぶせ上面の鉄板に半径の異なる円形の小孔をいくつかあけて順次その1つから水蒸気を逸出させ、ドラム管内の圧力を外圧に対してwater manometerで測定して蒸気量を求めている。清野⁹⁾は雌阿寒岳、昭和新山の噴気孔に対しピラム型風速計を用いて噴出する水蒸気の手速を求め、その断面積を概測して蒸気量を推定している。湯原¹⁰⁾は別府において噴気井の鉄管の口から噴出する蒸気と水の混合体について、噴出口の中心の速度をピトー管を用いて測定し理論的に平均流速を推定し

7) 早瀬喜太郎; 跡登佐硫黄鉱山における噴気孔の研究, 早稲田大学鉱山学研究報告.

8) G. R. ROBSON and P. L. WILLMORE; Some heat measurement in West Indian soufrieres, Bull. Volcanologique, Series II, 17 (1955), 13.

9) 清野正明; 噴気現象の考察(その1), 火山2集, 3 (1959), 128.

10) 湯原浩三; 別府周辺噴気孔の噴出熱量と熱力学的性質, 大分県温泉調査研究会報告, 15 (昭39), 15.

噴気の平均密度をも測定して蒸気量と水量を求めている。

アトサヌプリの場合は天然噴気孔であるので湯原の方法は用いられないし、清野の方法では噴出蒸気の範囲をきめることがむづかしい。早瀬または ROBSON の方法が都合がよいが、実測の場合どうしても装置と土の接触部から蒸気が多少洩れるのと、装置を噴気孔にかぶせて圧力が上昇すると直ぐ近くに地下で連絡している噴気孔がある場合には、測定中の噴気孔の蒸気量が自然の場合よりも多少減少する傾向があるので ROBSON の方法を採用することとし、これを流線型に改良して後に述べる口の係数 C をできるだけ 1 に近づけるようにした。

(1) 蒸気量測定装置と測定法

筆者らが製作使用した装置を第 7 図に示した。この装置の下の方 A を噴気孔にかぶせ、上の口 B から蒸気を逸出せしめ、円筒内の圧力 p_1 を大気圧 p_2 に対しアルコール圧力計で測定するのである。エチル・アルコールを用いたのは気温が低かったので凍結を防ぐためである。第 8 図において測定した圧力差を $\Delta p = p_1 - p_2$ 、水蒸気の密度を ρ 、圧力計を取付けた円筒部と

上の出口との高さの差を l 、重力の加速度を g 、円筒下部の直径を D 、上の出口の口径を d 、下の円筒内の流速を v_1 、上の出口の水蒸気の噴出速度を v とすれば、BERNOULLI の方程式から

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho gl + \frac{\rho v^2}{2} \quad (2)$$

連続の条件から

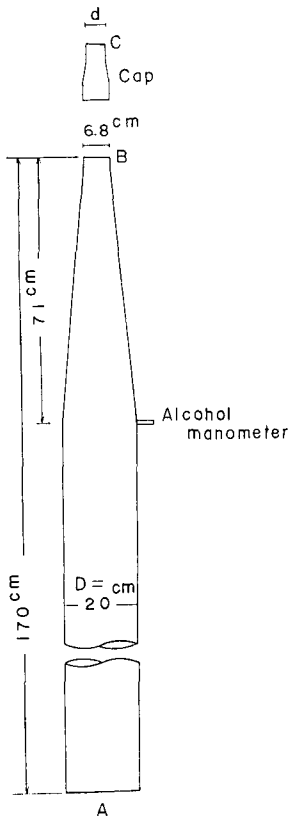
$$\frac{v_1}{v} = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (3)$$

となる。但し、ここでは水蒸気を非圧縮流体とみなしたが、後に述べるように、このための誤差は 2% 程度に過ぎない。

(2) と (3) 式から v_1 を消去して v を求めると

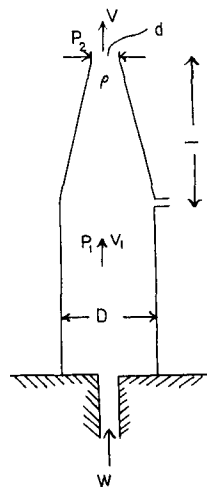
$$v = \left[\frac{2(\Delta p - \rho gl)}{\rho \left\{ 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4 \right\}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

が得られる。第 7 図の装置では $D=20.0$ cm, $d=6.8$ cm であるので $(d/D)^4=0.013$ であるから (4) 式の $(d/D)^4$ は無視して差支えない。また $l=71.0$ cm としたが、 v の値が特別小さい場合でなければ ρgl の項も無視せられる。



第 7 図 蒸気量測定装置

Fig. 7. A measuring device for steam discharge from fumaroles.



第 8 図
Fig. 8.

装置の上の口より出る蒸気量を W とすれば

$$W = C\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 \rho v \quad (5)$$

で与えられる。但し、 C は装置の噴出口に関する係数で $C \leq 1$ である。この装置の C の値については装置の検定の項に述べる。

しかし、測定の際には、装置と地面の接触部から蒸気が多少洩れたり、付近の噴気孔から蒸気が逃げることが多い。いま、地面下浅い所まで1通路で上昇した水蒸気が2つに枝分れして一方は測定中の噴気孔にかぶせた装置の上の口から速度 v で噴出していると、他方は測定していない他の噴気孔から直接空気中に速度 v' で出ているものと仮定する。他の噴気孔の口から装置の上の口までの高さを l' とすれば

$$\frac{v^2}{2} + gl' = \frac{v'^2}{2} \quad (6)$$

という関係がある。 $v' - v = \Delta v$ 、 $\frac{v' + v}{2} = v_m$ として $\frac{\Delta v}{v_m}$ を求めると

$$\frac{\Delta v}{v_m} = \frac{gl'}{v_m^2} \quad (7)$$

である。この装置では $l' = 170$ cm、 v は後に述べるように $10 \sim 30$ m/sec のことが多いので $v_m = 20$ m/sec として代入すれば $\frac{\Delta v}{v_m} \approx 0.04$ となる。すなわち、4% 位の誤差を許せば、装置の上の口の噴出速度と測定中の噴気孔と地下で連絡のある他の噴気孔の噴出速度は等しいと考えられる。したがって、この2つの噴気孔に分岐以前の地下通路の水蒸気量を W_0 とし、他方の噴気孔の有効面積を S とすれば

$$W_0 \approx C\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 v\rho + Sv\rho \quad (8)$$

$$\therefore \frac{1}{v} \approx \frac{C\pi\rho}{4W_0} \left(d^2 + \frac{4S}{C\pi}\right) \quad (9)$$

が得られる。 $\frac{C\pi\rho}{4W_0}$ および $\frac{4S}{C\pi}$ はその噴気孔では常数であるから、装置の口の直径 d を数回変えて $4p$ を測定して (4) 式から噴出速度 v を計算し、横軸に d^2 をとり縦軸にそれに対応する $1/v$ をとって点をとれば、 $1/v$ と d^2 との間には直線的関係があり、その直線の傾斜から $\frac{C\pi\rho}{4W_0}$ が得られるから、したがって W_0 の値が求められる理である。

この目的で装置の口 $d = 6.8$ cm のほかに、 $d = 4.9$ cm, 4.0 cm, 2.95 cm および 1.50 cm の4段の cap を逐次かぶせるように工夫した。

(2) 非圧縮性の仮定による誤差

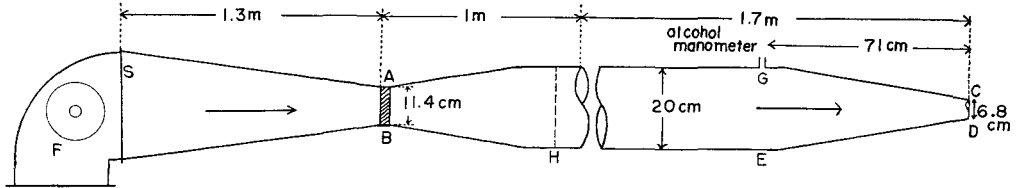
上記の計算においては、水蒸気を非圧縮性流体と仮定したが、このために起る誤差の程度

11) 例えば、谷 一郎；流れ学 (岩波全書) (1951), 15.

を吟味しよう。この問題については空気の場合に対して既に計算されている¹¹⁾。後に述べるように実測の結果では装置の上の口からの噴出速度は 60 m/sec が最高であったが、大きく見積って $v=100$ m/sec とし、空気の代りに水蒸気の値 $\rho=0.606 \times 10^{-3}$ g/cm³ および $c_p/c_v=1.33$ (但し、 c_p および c_v は水蒸気の定圧および定積比熱である) を入れると、非圧縮性を仮定したことによる水蒸気密度の誤差は 2.2% となる。つまり、2% 程度の密度変化を無視すれば 100 m/sec 以下の噴出速度では圧縮性を省略して差支えないことになる。

(3) 管口係数 C の測定

蒸気量測定装置における管口係数 C を求めるため次の実験を行なった。この実験では蒸気の代りに空気 (常温) を用いたが式の取扱いは前項により非圧縮流体として取扱った。第 9 図は実験装置であるが、蒸気量測定装置 E を図のように送風機 F に接続した。送風機はモー



第 9 図 蒸気量測定装置の管口係数 C を求める実験装置

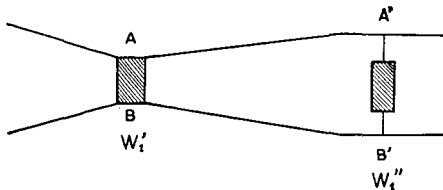
Fig. 9. Experimental apparatus for estimating mouth coefficient C of the steam discharge measuring device.

ター (1 馬力) により動かし送風量を変化できるようにしてある。また、大きな渦を消すために送風機の前面には目の細い金網をとりつけた。送風機によって送られてきた空気の風速は AB にとりつけたピラム微風速計 (気象庁検定) によって実測し AB の断面積から空気量 W_1 を求めた。また、同時に G にとりつけたアルコール・マノメーターによって管内の圧力を大気圧に対して測定し CD における流速 v_a を (4) 式によって計算した。この際 ρ には水蒸気密度の代りに空気の密度を用いたことは申す迄もない。

連続の条件から

$$W_1 = C\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2\rho v_a \quad (10)$$

となるが、 $W_2 \equiv \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2\rho v_a$ とおけば $C = \frac{W_1}{W_2}$ (11) から C を求めることができる。



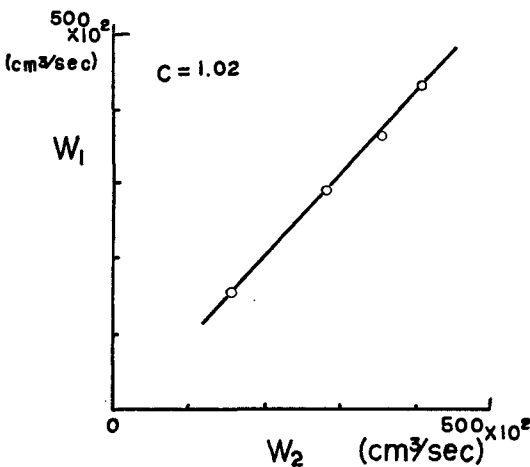
第 10 図

Fig. 10.

ピラム微風速計は自由大気の中で使用するようには検定されているので、この装置のように使用するためには再検定が必要である。このためにこの装置の直径 20 cm の円筒部 A' B' (第 9 図 H) の中央に他のピラム微風速計を第 10 図のように吊って 2 つの微風速計の読みと管の断面積とから計

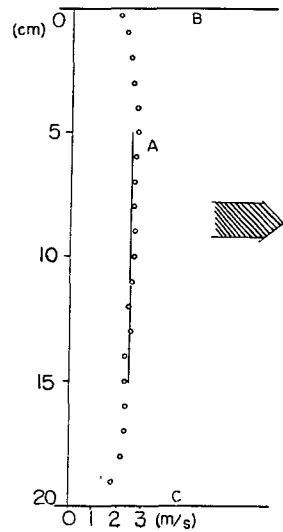
算された流量 W_1' (A B における値) と W_1'' (A' B' における値) とを比較した結果, $W_1'' = 0.70 W_1'$ を得た。A' B' に吊った第 2 の微風速計の断面積と, 微風速計と管壁との隙間の断面積との比は 1:2.08 であるから第 2 の微風速計に及ぼす管壁の影響は無視できるものとした。次に, 第 2 の微風速計の風速の実測値に管の断面積を掛けて流量を求めるためには管の中の流速の分布が一樣でなければならない。これを確かめるために装置の口 C D の流速が蒸気量測定時の値の中間値に近い 20.45 m/sec の場合, 第 9 図 H 断面における管内の流速分布を pitot tube と傾斜管圧力計を用いて測定した。但し, 使用した pitot tube のピトー係数は 0.99~1.01 の範囲であった。第 11 図はその結果であって管壁から 1 cm 以外はほぼ一樣な流速となっていることが判った。管内の平均流速を計算すると 2.37 m/sec であった。同じ場所の管内中央にピラム微風速計を吊って求めた流速は 2.47 m/sec であったから 4% 程の誤差を許せば微風速計の風速の読みと管の断面積から流量を計算しても差支えないことになる。

この様な吟味を行なった後, 第 9 図の実験を行なって異なった流量に対しそれぞれ W_1 および W_2 を得た。第 12 図は 1 例として W_2 を横軸に W_1 を縦軸にとって蒸気量測定装置の口径 4.9 cm (第 1 の cap) の場合



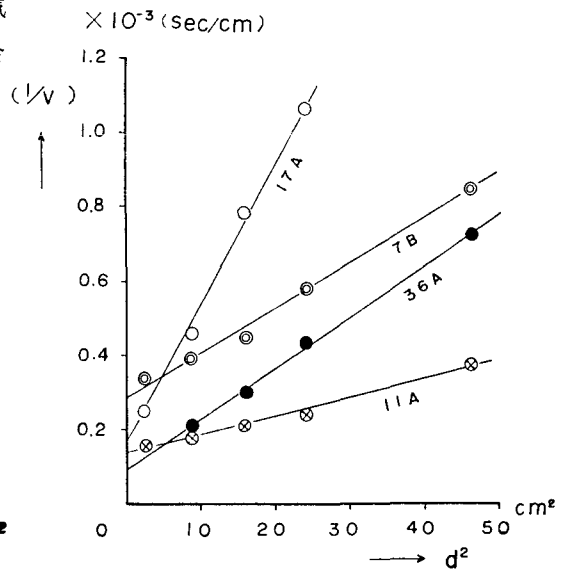
第 12 図 W_1 と W_2 との関係

Fig. 12. Relation between true flow W_1 and apparent flow W_2 .



第 11 図 管内流速分布 (A はピラム微風速計による流速, B, C は管壁)

Fig. 11. Velocity distribution in a plane perpendicular to flow (A: velocity by Bil-lam's Anemometer, B, C: Wall of tube).



第 13 図 実測値から $1/v$ と d^2 との間に直線的関係の存在を示す 4 例

Fig. 13. Four examples indicating a linear relation between $1/v$ and d^2 .

の実測値を白丸で記入したものであるが、(11) 式から期待されるように W_1 は W_2 に比例している。この比例常数 C すなわち管口係数として $C=1.02$ が得られた。全く同様に cap なし (口径 6.8 cm) または第 2 の cap (口径 4.0 cm) を取付けた場合に対してそれぞれ $C=1.00$ および $C=1.05$ が得られた。

前に述べたような種々な理由から、測定には 4% 程度の誤差が伴うことと、管口係数は $C \leq 1$ であることを考慮して $C=1.00$ を採用する。

(4) 噴気孔の蒸気量

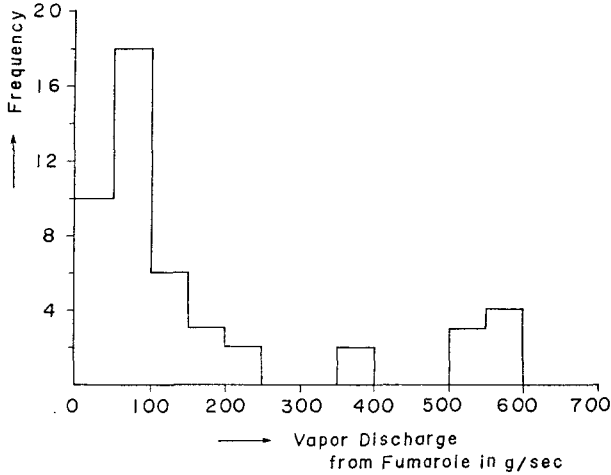
この装置と方法を用いて昭和 39 年 3 月 16~18 日に第 4 図および第 5 図にその位置を示した A, B 両地区の 50 の噴気孔の蒸気量 W_0 を測定した。第 13 図は装置の口の直径 d を変えてそれに対応する水蒸気の噴出速度 v を求めた結果から、(9) 式によって W_0 を求めるための $1/v$

第 2 表 A, B 両地区における噴気孔の温度と蒸気量
(昭和 39 年 3 月 16~18 日測定)

Table 2. Temperature and rate of steam discharge of fumaroles in A and B areas, Atosanupuri measured during March 16~18, 1964.

No.	温 度 (°C) Temp.	蒸 気 量 (g/sec) Steam Discharge	No.	温 度 (°C) Temp.	蒸 気 量 (g/sec) Steam Discharge
A- 1	98.0	24	A-26	100.7	396
A- 2	98.0	46	A-27	98.7	520
A- 3	97.5	—	A-28	98.8	130
A- 4	97.7	87	A-29	98.7	微
A- 5	97.5	38	A-30	104.0	62
A- 6	94.5	123	A-31	98.1	51
A- 7	98.0	63	A-32	98.6	76
A- 8	97.4	22	A-33	103.0	57
A- 9	98.7	57	A-34	98.0	98
A-10	97.7	35	A-35	98.2	98
A-11	—	90	A-36	98.4	35
A-12	95.9	123	A-37	97.5	59
A-13	97.0	235	A-38	98.2	147
A-14	97.6	81	B- 1	98.3	19
A-15	97.8	90	B- 2	98.0	123
A-16	95.8	51	B- 3	98.0	167
A-17	98.0	12	B- 4	98.7	586
A-18	97.0	81	B- 5	97.1	586
A-19	98.6	130	B- 6	99.1	235
A-20	98.5	181	B- 7	98.2	384
A-21	98.5	26	B- 8	100.0	94
A-22	98.6	54	B- 9	98.0	196
A-23	97.5	48	B-10	98.5	90
A-24	98.2	520	B-11	(98)	580
A-25	98.7	520	B-12	(112.3)	590

N. B. () 内の数字は第 1 次調査の値



第14図 噴気孔の蒸気量の頻度分布

Fig. 14. Histogram of vapor discharge from a fumarole

と d^2 との直線的関係の4実例を示したもので丸は実測値である。(9)式から判るように、水蒸気の密度 ($\rho=0.598 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$) と管口係数が与えられれば、この直線の傾斜から蒸気量 W_0 は求められる。このようにして求められた各噴気孔の蒸気量を第2表に示した。第14図は蒸気量を 50 g/sec 毎に区切って各区分毎の頻度を示したものである。

図から判るように、蒸気量はその噴気孔によってかなり差があり、 $10 \sim 590 \text{ g/sec}$ の広い範囲に亘っているが、 $10 \sim 250 \text{ g/sec}$ (特に $50 \sim 100 \text{ g/sec}$ のものが多い) の群と $350 \sim 590 \text{ g/sec}$ の群に大別される。この蒸気量の大きい群に属する噴気孔の中 500 g/sec 以上の蒸気量をもつものを第4図、第5図に二重丸で示した。また、蒸気量の小さい群に属するが蒸気量が 100 g/sec 以上の比較的大きいものと大きい蒸気量の群に属するが蒸気量が 400 g/sec 以下の中級の噴気孔を黒丸で示した。

蒸気量をA地区、B地区に分けて合計すれば、A地区は37の噴気孔で 4.5 kg/sec 、B地区は12の噴気孔で 3.6 kg/sec となり、A、B両地区を合計すれば49の噴気孔で 8.1 kg/sec となる。アトサヌプリ全域ではA、B地区以外に山頂付近にD、E、F、G等併わせて7口位の噴気孔があり、その他C地区その他にも微小な蒸気の噴出は高地温帯の諸所に見られるので、これらをA、B両地区の1噴気孔当りの平均蒸気量 0.165 kg/sec を用いて推定すれば、A、B以外の地区の蒸気量は 1.2 kg/sec 程度と見積られる。すなわち、アトサヌプリ全域から出る蒸気量は 9.3 kg/sec 程度と見るべきであろう。

噴気孔からの水蒸気の噴出速度につき一言しておこう。噴気孔の口の形は種々様々であるが、測定装置の下の口径 20 cm より小さいものが多数であった。装置の上の口の面積 36.3 cm^2 に対する噴出速度は $5 \sim 60 \text{ m/sec}$ の範囲内であったが、 $10 \sim 30 \text{ m/sec}$ のものが全体の66%を占めていた。

3. 噴気孔から水蒸気として放出される熱エネルギー

アトサヌプリ周辺の噴気孔から噴出する水蒸気の総量はおよそ 9.3 kg/sec と推定された。蒸気量測定当時の噴気孔の温度は水の沸騰温度 99°C の近くであった。川湯温泉における普通の地下水温度 10°C を規準にして水蒸気のもつ熱エネルギー Q_1 を算出すると

$$Q_1 = 9.3 \times 10^3 \times \{539 + 1.0 \times (99 - 10)\} = 5.8 \times 10^6 \text{ cal/sec}$$

となり、すなわち $Q_1 = 35 \times 10^7 \text{ cal/min}$ となる。

V. アトサヌプリから放出される総熱エネルギー

以上の調査結果から、アトサヌプリ周辺の多くの噴気孔から水蒸気として逸出する熱エネルギー Q_1 は $5.8 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ (すなわち $35 \times 10^7 \text{ cal/min}$)、高地温帯の地表から岩石伝いに空気中に逸散する熱エネルギー Q_2 は $2.0 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ (すなわち $12 \times 10^7 \text{ cal/min}$) と推定されたから、アトサヌプリ全域から放出される熱エネルギー Q_A は $7.8 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ すなわち $47 \times 10^7 \text{ cal/min}$ となる。1年間では $2.5 \times 10^{14} \text{ cal/yr}$ ということになるが、判り易いため 5,000 cal/gr の発熱量をもつ石炭の量に換言してみると1年間に 50,000 ton の石炭の燃焼熱に相当する。

VI. 川湯温泉—アトサヌプリ全域から放出される総熱エネルギー

福富・須川・藤木は川湯温泉の研究¹²⁾ 結果から、アトサヌプリ北側の噴気孔群と川湯温泉の源温泉とはアトサヌプリ北側の地下で連絡していることを述べ、アトサヌプリ北麓の地下深くから高温で Cl^- に富む液相の温泉水が上昇して、圧力の減少に伴って沸騰点に達し一部が気化して水蒸気となり、水蒸気の大部分は源温泉水から分離して割れ目に沿って上昇し噴気孔群を形成し、液状の温泉水は地下を北方に流動して川湯温泉として湧出しているのではと示唆している。また、川湯温泉として湧出する温泉が地下水に対し持っている熱量は $Q'_1 = 36.5 \times 10^7 \text{ cal/min}$ 、川湯—アトサヌプリ北麓間の地表から空気中に逸散している熱量は $Q'_2 = 16.7 \times 10^7 \text{ cal/min}$ で、これらの合計は $Q_k = 53.2 \times 10^7 \text{ cal/min}$ ($8.8 \times 10^6 \text{ cal/sec}$) であることを述べている。

この結果とこの度のアトサヌプリの調査結果とから、川湯温泉—アトサヌプリ全域から放出されている総熱エネルギーは $Q_T = Q_A + Q_k = 16.6 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ すなわち $100 \times 10^7 \text{ cal/min}$ となる。1年間では $5.2 \times 10^{14} \text{ cal/yr}$ になり、燃焼熱 5,000 cal/g の石炭の量に換算すれば1年間 10 万 ton の石炭が燃える熱に相当する。アトサヌプリ周辺に出ている総熱量 $Q_A = 7.8 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ と川湯方面に分岐している総熱量 $Q_k = 8.8 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ とがやや同程度の値であったことは注意すべきである。

12) 前出 2)

VII. アトサヌプリ地下における熱水・水蒸気の状況

前章に述べた福富・須川・藤木のアトサヌプリ噴気孔と川湯温泉の成因についての示唆につき以下定量的検討を試みてみよう。

アトサヌプリの地下ある深さにおいて水蒸気と熱水が分離したとすれば、その分離を容易にするためにはある程度の容積の空洞を考えねばならない。川湯温泉とアトサヌプリ噴気孔のほぼ中央での温水流管の深さは 80 m と推察されているので、噴気口の高度を考慮して、噴気孔とこの空洞との高度差を一応大略 200 m と想定してみよう。この空洞内の水蒸気の圧力を p_0 、温度を T_0 、密度を ρ_0 とし、これが割れ目を伝って噴気孔まで定期的に上昇する途中で熱 Q_2 だけを熱伝導で失ったとすれば、この空洞部と割れ目の他端である噴気孔に BERNOULLI の法則を拡張して適用すれば

$$\frac{p_0}{\rho_0} + c_v T_0 = \frac{v^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gz + c_v T + \frac{Q_2}{y}$$

を得る。但し、 c_v は水蒸気の定積比熱、 y は噴気孔から逸出する蒸気量、 v は噴出速度、 ρ は水蒸気密度、 p_2 は大気圧、 g は重力の加速度、 T は噴気孔の温度である。この式を書き換えると

$$\left(\frac{p_0}{\rho_0} - \frac{p_2}{\rho} \right) + c_v (T_0 - T) = \frac{Q_2}{y} + \frac{v^2}{2} + gz \quad (12)$$

を得る。いま、測定値から $v=60$ m/sec, $Q_2=2.0 \times 10^{-6}$ cal/sec, $y=9.3 \times 10^3$ g/sec, $T=100^\circ\text{C}$, $c_v=0.36$ cal/g $^\circ\text{C}$, $p_2=1$ 気圧とし、 $z=200$ m, $T_0=150^\circ\text{C}$, $p_0=4.6$ 気圧と仮定してみると、左辺の第 2 項と右辺の第 1 項を除き他項は微小である。すなわち、近似的には熱の項だけ考えて力学的項を無視しても差支えないことを意味する。従って、 T_0 を未知として (12) 式から求めると $T_0 \approx 700^\circ\text{C}$ となる。空洞内では水蒸気と熱水とが共存しているとの仮定に対し、この温度はあまりにも高温に過ぎる。

測定の際、温度計を噴気孔に挿入すると水滴が滴下するのがしばしば観察された。これは水蒸気が上昇の途中、冷却されて凝結を起していることを意味する。従って、この事を考慮し凝結した水は降下して温度 T_0 となるものとし、力学項を無視すれば (12) 式の代りに

$$Q_2 = y_0 c_v (T_0 - T) + (y_0 - y) l - (y_0 - y) c_l (T_0 - T)$$

を得る。但し、 y_0 は空洞から上昇した蒸気量、 l は水の蒸発の潜熱、 c_l は水の比熱である。この式から y_0 を求めると

$$y_0 = \frac{Q_2 + y \{ l - c_l (T_0 - T) \}}{l - (c_l - c_v) (T_0 - T)} \quad (13)$$

を得る。

$T=99^{\circ}\text{C}$, $c_l=1.0$, $l=539\text{ cal/g}$ とし, 他の値は前の値を用いる。測定された噴気孔温度の最高は 118°C であったから T_0 の値には 118°C , 120°C , 150°C の3つの値を代入して y_0 を求めると次の結果を得た。

$$\left. \begin{array}{l} T_0 = 118^{\circ}\text{C}; y_0 = 13.0 \times 10^3 \text{ g/sec} \\ T_0 = 120^{\circ}\text{C}; y_0 = 13.0 \times 10^3 \text{ g/sec} \\ T_0 = 150^{\circ}\text{C}; y_0 = 12.9 \times 10^3 \text{ g/sec} \end{array} \right\} y_0 = 13.0 \text{ kg/sec}$$

すなわち, $T_0=118^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{C}$ の値に対して y_0 はほぼ 13.0 kg/sec の一定値を示している。

ゆえに, 凝結水量は $y_1=y_0-y=3.7\text{ kg/sec}$ であることが判った。

次に, アトサヌプリの地下空洞から川湯温泉へ向って分岐した熱水量 x_0 を推定しよう。川湯方面へ分岐した熱水の普通地下水温 θ に対する総熱量 Q_k は判っている。ゆえに, x_0 と T_0 および Q_k の関係は次式で与えられる。

$$x_0 c_l (T_0 - \theta) \simeq Q_k \quad (14)$$

いま, $\theta=10^{\circ}\text{C}$, $Q_k=8.8 \times 10^6\text{ cal/sec}$ とし, $T_0=118^{\circ}$, 120° , 150°C に対する x_0 の値を求めると

$$\left. \begin{array}{l} T_0 = 118^{\circ}\text{C}; x_0 = 82 \times 10^3 \text{ g/sec} \\ T_0 = 120^{\circ}\text{C}; x_0 = 80 \times 10^3 \text{ g/sec} \\ T_0 = 150^{\circ}\text{C}; x_0 = 63 \times 10^3 \text{ g/sec} \end{array} \right\}$$

を得る。

従って, アトサヌプリ地下の空洞よりも更に地下深い所において上昇する熱水量 χ_0 は

$$\chi_0 = y_0 - y_1 + x_0 \quad (15)$$

である。但し, y_1 は凝結水量である。ゆえに, 空洞中の熱水の温度 T_0 を $118^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{C}$ とすれば

$$\left. \begin{array}{l} T_0 = 118^{\circ}\text{C}; \chi_0 = 91 \times 10^3 \text{ g/sec} \\ T_0 = 120^{\circ}\text{C}; \chi_0 = 89 \times 10^3 \text{ g/sec} \\ T_0 = 150^{\circ}\text{C}; \chi_0 = 72 \times 10^3 \text{ g/sec} \end{array} \right\}$$

となる。アトサヌプリ地下の空洞内においては水蒸気および熱水の温度 T_0 は圧力 p_0 に対する水の沸点にあると考えられるが, それより更に深い割れ目内においては圧力の上昇に伴い水蒸気が液相の熱水に対する割合は次第に減少して, ある深さに至ると H_2S , SO_2 , CO_2 などの gas を除き, 水蒸気は全く存在しなくなるはずである。この深さにおける熱水の温度を θ とすれば次の関係が近似的に成立つであろう。

$$Q_T = Q_A + Q_k \simeq \chi_0 c_l (\theta - \theta) \quad (16)$$

$Q_T=16.6 \times 10^6\text{ cal/sec}$, $\theta=10^{\circ}\text{C}$ とし, $T_0=118^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{C}$ に対する χ_0 の値を入れると

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= 118^\circ\text{C}; \quad \theta = 192^\circ\text{C} \\ T_0 &= 120^\circ\text{C}; \quad \theta = 196^\circ\text{C} \\ T_0 &= 150^\circ\text{C}; \quad \theta = 240^\circ\text{C} \end{aligned} \right\}$$

となる。

いま $S(T)$ を圧力 $P(T)$ に対する水の沸点 T で全部液相であった熱水が水蒸気化しながら上昇して大気圧に対する水の沸点 100°C の温泉となったときにおける水蒸気の重量比とすれば、次の関係が成立する。

$$y_0 = x_0 S(\theta) - (x_0 - y_0) S(T_0) \quad (17)$$

$$\therefore \frac{y_0}{x_0} = \frac{S(\theta) - S(T_0)}{1 - S(T_0)} \quad (18)$$

$\frac{y_0}{x_0}$ は地下深くから上昇した熱水量 x_0 に対する空洞から噴気孔へ向って上昇した水蒸気量 y_0 の割合であって T_0 が判っておれば x_0 もきまり、 $y_0 = 13.0 \text{ kg/sec}$ と推定されているので求められる。この値を $\left(\frac{y_0}{x_0}\right)_{\text{Est.}}$ とする。また、D. E. WHITE¹³⁾ により $S(T)$ は計算されているので、 $S(\theta)$ および $S(T_0)$ も T_0 が判っていれば求められる。従って、(18) 式によって $\frac{y_0}{x_0}$ の値がきまる。この値を $\left(\frac{y_0}{x_0}\right)_{\text{Cal.}}$ とする。前例に従って $T_0 = 118^\circ \sim 150^\circ\text{C}$ とすれば次の結果を得る。

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= 118^\circ\text{C}; \quad \left(\frac{y_0}{x_0}\right)_{\text{Est.}} = 14.3\%, \quad \left(\frac{y_0}{x_0}\right)_{\text{Cal.}} = 14.7\% \\ T_0 &= 120^\circ\text{C}; \quad \left(\frac{y_0}{x_0}\right)_{\text{Est.}} = 14.6\%, \quad \left(\frac{y_0}{x_0}\right)_{\text{Cal.}} = 15.3\% \\ T_0 &= 150^\circ\text{C}; \quad \left(\frac{y_0}{x_0}\right)_{\text{Est.}} = 17.9\%, \quad \left(\frac{y_0}{x_0}\right)_{\text{Cal.}} = 19.9\% \end{aligned} \right\}$$

上の $\left(\frac{y_0}{x_0}\right)_{\text{Est.}}$ と $\left(\frac{y_0}{x_0}\right)_{\text{Cal.}}$ の値を比較してみると、 $T_0 = 118^\circ\text{C}$ の場合が比較的よく一致している。この温度よりも少し低い所が最もよく一致すると思われるが、噴気孔温度の最高値が 118°C であったことから考えて $T_0 = 118^\circ\text{C}$ をとるのが妥当であろう。従って y_0 , x_0 , x_0 および θ についても $T_0 = 118^\circ\text{C}$ に対応する値をとるべきである。

すなわち、福富・須川・藤木による川湯温泉の研究結果から推察された川湯温泉水の起源およびアトサヌプリ噴気孔と川湯温泉との関係について、この度のアトサヌプリの研究結果から検討した結果、合理的であるとの結論を得た。

アトサヌプリの地下における水蒸気および熱水の湧出機構を第 15 図に模型的に示したが、その概略の説明は以下の様である。

地下深くから岩石の割れ目伝いに上昇した温度およそ 192°C 、水量 91 kg/sec で Cl^- , SO_4^{2-} などを溶解し、 CO_2 , H_2S , SO_2 などの少量の gas を含む液相の熱水が、圧力 13 気圧ぐらい

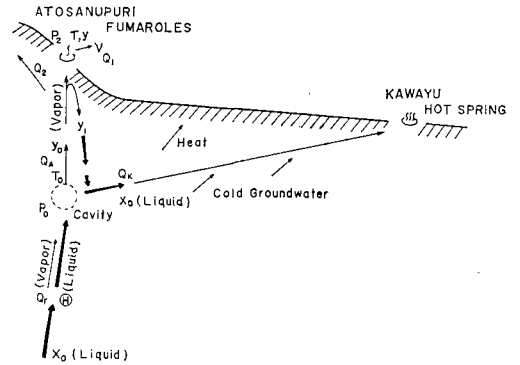
13) D. E. WHITE; Violent Mud-Volcano Eruption of Lake City Hot Springs, Bull. Geol. Soc. Amer., 66 (1955).

の深さにおいて水の沸点に達し、以後は水蒸気、gas と熱水との混合流体として上昇を続けるが、次第に水蒸気の熱水に対する混合比が増加し温度は漸次低下する。温度がおよそ 118°C に低下した所で空洞に遭遇し、この中で水蒸気 (13 kg/sec) および CO_2 , H_2S , SO_2 などの気相と熱水とが分離し、水蒸気および gas は割れ目伝いに真直ぐ上昇してアトサプリの A, B 地区などの噴気孔から空気中に逸出するが、水蒸気の一部 (3.7 kg/sec) は上昇の途中で冷却されて凝結しその際 HSO_4^- を得て割れ目を流下して空洞中の熱水と合流するものと思われる。空洞から川湯温泉へ向って流出する熱水量 (82 kg/sec) は途中で冷却され、また冷地下水と混合して約 3 km 隔った川湯温泉において全部地表に湧出するものと思われる。

なお、推定された各量の概値は次の通りである。

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1) 噴気孔から水蒸気として放出される熱エネルギー | : $Q_1 = 5.8 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ |
| 2) アトサプリアから熱伝導により放出される熱エネルギー | : $Q_2 = 2.0 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ |
| 3) アトサプリア全域から出る総熱エネルギー | : $Q_A = 7.8 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ |
| 4) (川湯温泉-アトサプリア北麓) 域から出る総熱エネルギー | : $Q_k = 8.8 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ |
| 5) 噴気孔から出る蒸気量 | : $y = 9.3 \times 10^3 \text{ g/sec}$ |
| 6) 地下空洞から上昇する蒸気量 | : $y_0 = 13.0 \times 10^3 \text{ g/sec}$ |
| 7) 地下空洞から噴気孔までの間の凝結水量 | : $y_1 = 3.7 \times 10^3 \text{ g/sec}$ |
| 8) 地下空洞から川湯温泉に流動する熱水量 | : $x_0 = 82 \times 10^3 \text{ g/sec}$ |
| 9) 地下空洞内の水蒸気および熱水の温度 | : $T_0 = 118^{\circ}\text{C}$ |
| 10) 地下深くから上昇する熱水(液相)が沸点に達した温度 | : $\theta = 192^{\circ}\text{C}$ |
| 11) 地下深くから上昇する熱水(液相)が沸点に達した圧力 | : $P_0 = 13.0 \text{ 気圧}$ |
| 12) 地下深くから上昇する熱水量 | : $x_0 = 91 \times 10^3 \text{ g/sec}$ |
| 13) 地下深くから上昇した熱水が持つ熱エネルギー | : $Q_T = 16.6 \times 10^6 \text{ cal/sec}$ |

すなわち、アトサプリア噴気孔および川湯温泉の起源は、アトサプリアの地下深くにある高温ではあるが液相の熱水であることが推定された。また、放出される熱エネルギーの大きさからみて北海道では登別温泉全域に次ぎ第2位であることが判った。北海道で第1位で、しかも活動の変化が火山活動に似た点のある登別温泉地域における温泉の起源がやはり高温な液相



第15図 アトサプリアの地下における水蒸気および熱水の湧出機構の説明図

Fig. 15. Schematic representation on mechanism of formation of steam and hot water in the underground of Atosanupuri fumaroles.

の熱水であること¹⁴⁾を併せ考えると、火山活動と温泉活動との差違は地下熱水の温度が水の critical temperature より高いか低いかにあることを示唆するように思われる。

VIII. 総括および結語

昭和38年11月と39年3月の2回に亘り北海道屈斜路カルデラ内にあるアトサヌプリ地熱地帯について、1m深地温分布、噴気孔の温度および蒸気量の測定を行ない、その結果から、熱伝導により地表から空気中に逸散する熱エネルギー、水蒸気として出ている熱エネルギーの総量を推算し、地下における水蒸気の湧出機構、地下における熱水の温度、アトサヌプリ噴気孔と川湯温泉との関係などにつき考察を行なった。その結果を総括すれば次の様である。

1) 1m深地温の測定結果から、アトサヌプリ周辺にはA, B, C三帯の高地温帯があるが、これらの高温帯は岩石の割れ目に沿って地下から噴出している水蒸気からの熱に原因していること、また、Aにはおよそ50口の大小の噴気孔が、Bにはその北部地区に12口以上の噴気孔が存在するが、Cには微小な噴気孔しか存在しないことが判った。

2) 噴気孔の温度は、昭和38年11月の調査では93°~118°C、39年3月の調査では94°~104°Cであったが、両調査を通じて97°~99°Cのものが70%以上であり、多くは土地の高度に対する水の沸点に近い温度であった。蒸気量については各噴気孔により10~580 g/secの範囲で異なる値を示したが、アトサヌプリ地域の水蒸気量の合計は 9.3×10^3 g/secと概算された。

3) アトサヌプリ一帯の地表から熱伝導により空気中に逸散している熱エネルギーの概値は $Q_2 = 2.0 \times 10^6$ cal/secであること、噴気孔から水蒸気として流出する熱エネルギーの概値は $Q_1 = 5.8 \times 10^6$ cal/secであること、従ってアトサヌプリ全域では総計 $Q_A = 7.8 \times 10^6$ cal/sec、すなわち、 47×10^7 cal/minの熱エネルギーが放出されていることが推定された。

4) 前に福富・須川・藤木は川湯温泉についての研究結果から、川湯温泉とアトサヌプリ噴気孔とはアトサヌプリの地下深くに存在する液相の熱水に起源していることを示唆したが、この度の調査においてもアトサヌプリのA, B高地温帯は川湯温泉からアトサヌプリ北麓に連なる高地温帯と接続していることが確かめられた。さらに、近似的ではあるが定量的に地下状態につき検討した結果、上に述べた噴気孔と川湯温泉の起源は液相の熱水であることを確かめ、その温度はおよそ192°C、量は 91×10^3 g/sec程度、その圧力は13気圧以上であることを推定した。

5) アトサヌプリから川湯温泉に至る全域から出る総熱エネルギー Q_T は 16.6×10^6 cal/secすなわち、 100×10^7 cal/minであって、放出する熱エネルギーの大きさから言えば北海道の温泉では登別温泉全地域に次いで第2位である。温泉の熱階級¹⁵⁾で表わすとVとVIの境界に位置している。

14) 福富孝治・藤木忠美；昭和26年11月~27年3月頃の登別温泉地獄谷の活動，北大地球物理学研究報告，3 (1953), 37.

15) T. FUKUTOMI; Rates of Discharge of Heat Energy from the Principal Hot Spring Localities in Hokkaido, Journ. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Series VII, 1-5 (1961), 322.

終りに臨み、本研究に要した費用は北海道大学理学部地質学鉱物学教室の石川俊夫教授を担当者とする“北海道における地熱の開発利用の試験的研究”に与えられた北海道科学研究費と福富に与えられた文部省科学研究費によって行なわれたことを記し謝意を表す。また、現地調査の際は野村鉱業株式会社阿登佐鉱業所の方々に御助力をいただいた。ここに厚く謝意を表す次第である。

6. A Geophysical Investigation on Fumaroles around Atosanupuri Dome in Eastern Hokkaido

By Takaharu FUKUTOMI, Akira SUGAWA, Daiji KOBAYASHI,
Eiji TOKUNAGA, Akio WADA and Tôru WAKE

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

Atosanupuri Dome, situated at the eastern part of the Kucharo Volcanic Caldera in Eastern Hokkaido, has about 70 fumaroles around the dome. The writers had opportunities of observing horizontal distribution of underground temperature at a depth of 1 m, temperature and rate of steam discharge of active fumaroles in the neighborhood of Atosanupuri Dome during periods from Nov. 19 to Nov. 21, 1963 and from March 16 to March 18, 1964.

From these measurements, total heat energy flowing out from ground surface due to heat conduction, and total heat energy discharging as steam from fumaroles were estimated. Mechanism of steam formation in the underground, temperature of liquid thermal water in the deep, and the relation between those fumaroles and Kawayu Hot Springs situated at a distance of about 3 km from the former were also discussed. The results are summarized as follows:

1) Three high underground temperature zones A, B and C exist around the Atosanupuri Dome as shown in Fig. 1. These zones may be caused by conducted heat from steam which is ascending from the deep through fractures in underground rock. About 50 fumaroles and more than 12 fumaroles are respectively found along A and B zones, but no active fumaroles is seen along C zone.

2) Temperature of fumarole shows respectively 93°-118°C and 94°-104°C at the first and the second observations (Fig. 6), but frequency of fumarole, of which temperature is in an extent from 97° to 99°C, indicate more than 70% of the total numbers. It means that many fumaroles have nearly the same temperature as the boiling point of water 98.8°-99.4°C at the height of these fumaroles. Rate of steam discharge from a fumarole is in an extent from 10 to 580 g/sec, and the total sum for all of fumaroles around Atosanupuri Dome is estimated as 9.3×10^3 g/sec.

3) Order of magnitude of total heat discharging from fumaroles as steam Q_1 , that flowing out from the ground surface of Atosanupuri area Q_2 and the total sum $Q_A = Q_1 + Q_2$ are respectively given in the following.

$$Q_1 = 5.8 \times 10^6 \text{ cal/sec}$$

$$Q_2 = 2.0 \times 10^6 \text{ cal/sec}$$

$$Q_A = 7.8 \times 10^6 \text{ cal/sec.}$$

4) From the investigation of Kawayu Hot Springs, FUKUTOMI, SUGAWA and FUJIKI suggest, in their paper, that Kawayu Hot Springs and Atosanupuri Fumaroles are supposed to originate from a hot water of liquid phase which is ascending from the deep to the underground of the fumaroles. It is ascertained by the result of the writers' observation that the high ground temperature zones A and B connect with those extended from Kawayu Hot Springs to the northern foot of Atosanupuri Dome as illustrated in Figs. 1 and 2. Further, from the theoretical investigation on the underground condition of water, origin of Kawayu Hot Springs and the fumaroles may be attributed to the above-mentioned hot water of liquid phase, of which temperature is about 192°C, the rate of flow is nearly 91×10^3 g/sec and the pressure is more than 13 atmospheric pressure.

5) Order of magnitude of total sum of heat energy discharged from the locality containing Atosanupuri Dome and Kawayu Hot Springs is estimated as 16.6×10^6 cal/sec. This value is the largest heat energy but that of Noboribetsu Hot Springs among those discharging from hot spring localities in Hokkaido.