

箱根火山の蒸気

大山正雄, 平野富雄, 栗屋 徹, 鈴木孝雄

神奈川県温泉研究所*

(昭和46年2月12日受理)

Vapeurs naturelles du Volcan de Hakone

par

Masao ŌYAMA, Tomio HIRANO, Tōru AWAYA et Takao SUZUKI

Institut des Sources Chaudes de la Préfecture de Kanagawa

Hakone, Kanagawa

(Résumé)

Nous avons fait les observations du débit et du dégagement de chaleur des vapeurs naturelles qui sortent des événements dans les régions de fumarolle en le volcan de Hakone. Nos observations ont été exécutées pendant la période du 25 novembre 1970 au 29 janvier 1971. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 1.

Les températures dans ces puits qui ont été observées avec un thermomètre à mercure, ont été distribuées dans les limites de 95 à 149 °C, et la production totale de vapeur a été estimée de 35.8 kg/sec sur le fondement de nos investigations présentes.

En effet, le dégagement total de chaleur des vapeurs des puits et des sources chaudes en Hakone est estimé presque de 2.5×10^7 cal/sec. Il est remarquable que la chaleur sortant du puit de vapeur No. 1 à Ōwakudani forme une valeur importante, ou précisément 13.6 pour cent de la chaleur totale susdite.

Cependant, pour élucider la chaleur totale qui est sortie de l'intérieur du volcan de Hakone, il est nécessaire à ajouter celle de vapeur qui sort en l'état naturelle ou en la forme des fumarolles. Conséquemment, il est raisonnable que la quantité totale de l'énergie calorifique qui est fournie au fond de Hakone, sera évaluée probablement à 3×10^7 cal/sec.

*神奈川県箱根町湯本 〒250-03

神奈川県温泉研究所報告 第2巻, 第3号, 133—142, 1971

D'après notre investigation des formes de profil concernant la vitesse de vapeur dans le puit, nous avons obtenu le résultat suivant pour la rapport entre la vitesse moyenne (U) et la vitesse maximum (Umax):

$$U/U_{\max}=0.85\pm 0.06$$

Au cours de l'investigation présente, l'on constatait que la température et la quantité de vapeur en Yunohana qui est situé à la place au sud-est du mont Kamiyama, ont change brusquement comme les représentation dans le tableau 2. Mais, il est nécessaire à investiger de suite pour l'élucidation des changements de vapeur susmentionnés en Yunohana.

まえがき

箱根火山の地下から供給される熱エネルギーの規模を明らかにする目的で、1966年から箱根火山の蒸気の調査・研究を行なっている。箱根大涌谷・早雲山地域は昔から天然蒸気を噴出する高温の地熱地帯として知られている。火山の噴気熱量については福富(1966)、湯原(1964)などによる幾多の調査・研究がある。箱根火山において、最近、湯原(1968)は熱量測定装置を改良・考案し、箱根火山の放熱量を測定して、地下熱水系の解明に多大な貢献をした。その中で、箱根全域から放出されている熱量の約53%が噴気井によるものであることを報告している。

箱根火山の熱源やそれから供給される熱量、ならびに箱根火山の活動状況を考える場合、噴気井からの放熱量を連続観測することも重要である。

この報告では、噴気地帯とその周辺の主な噴気井からの放熱量を求め、さらに、箱根火山からの全放熱量について見積ることとした。

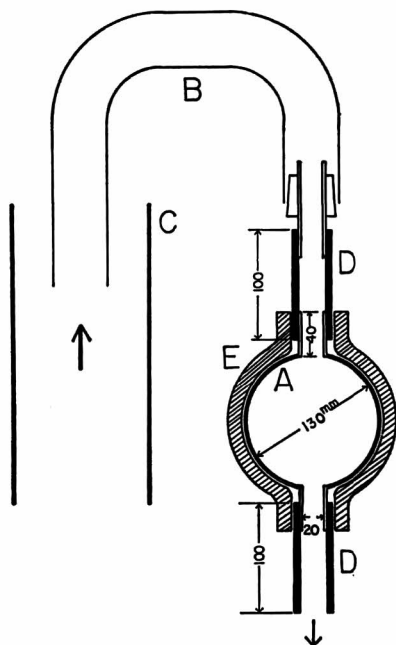


図1 噴気ガスの密度測定法

測定方法

i) 密度: 図1に示すように、断熱材でおおわれている直径13cmの耐熱ガラス球(A)の両端にゴム管を取付け、一方(B)を噴気井(C)の中に挿入する。ガラス球がガスの温度と同程度になった頃を見計らい、球の内壁の水滴を振落してから一気に両端のゴム管(D)を折曲げる。断熱材(E)を外し、水でもってガラス球を十分冷してからゴム管を取外し、質量増加を天秤で測定する。球内に昇華物がある場合はその分を差引く。なお、噴出ガス中には硫化水素や亜硫酸ガスなどの成分が含まれているが、水蒸気に比べ極めて微量なので噴出ガスを全て水蒸気とみなしている。密度は幾分大目に測定されるこ

とになるが、経験上この方法（大木・平野考案）が最もよいと思われる。

ii) 平均速度： 噴出速度は Pitot 管を用いて垂直の二直径上において測定する。U字管内にはアルコールを挿入し、1 mmまで肉眼で読む。高速流体の場合は水銀を用いる。噴気管内の流れは乱流とみなしてよいから、流量を Q 、面積を A 、半径を r とすると、平均流速は、

$$U = Q/A = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} 2\pi r u \, dr$$

であらわされる。

iii) 温度： 噴気は孔井を出ると外気と混合し、温度は急激に降下する。外気との熱交換を考慮して棒状留点水銀温度計を出口から 30cm 管内に挿入して測定する。なお、運動している流体中に温度計を挿入して温度を計る場合、全温 T_0 を測定することになり温度計の読みは静温 T より運動エネルギーによる動温だけ上昇するので（流体と同じ速度に走らせたときの温度計の読みが静温 T に相当する）温度補正を行なう。ガスが流速 U から流速 0 に断熱的に変化したとすれば、静温 T は次のようになる。

$$T = T_0 - \frac{1}{R} \frac{k-1}{k} \frac{U^2}{2g}$$

ただし、 k と g はそれぞれ比熱比及び重力加速度、 R はガス常数。

測定結果

i) 速度分布： 現在使用されずに大気中に蒸気を放出している多くの噴気井の出口付近は腐蝕や破損をし、あるいは、流れの進行方向の管断面積の変化や屈曲管のように方向変化している。流れは境界層が管中心に達する前に噴流(jet)となるため、測定可能な出口付近の管軸方向の速度分布は一定とならず、左右前後が非対称の様々な形状の分布となる。図2は大涌谷 No. 2, 7, 8と10(図5)の二直径上の速度分布と等速度線図である。測定された噴気井内の流れは次の3つに分類出来る。

No. 2, 7： 最大流速の位置は管軸から幾分ずれているが、線図は同心円的であり、境界層も発達している。一直径上の速度分布が指数函数的にあらわされていなくとも、垂直に立てられている噴気井内の流体はほぼこの様な流れ方をし、最大速度 U_{max} と平均速度 U との関係は、

$$U = (0.85 \pm 0.06) U_{max}$$

であらわされた。Nikuradse (1932), Stanton and Pannell (1914)は滑らかな管内の流れに対する実験から、 U/U_{max} と Reynolds 数との関係を次の様に報告している。乱流領域における U/U_{max} の値は、Reynolds 数とともに増加し、 U/U_{max} が0.85の値のとき、Reynolds 数は 2.98×10^5 に相当する。従って、全ての流れを上式によって統一することは事実と反する。この関係式は境界層が管中心に達する前、すなわち、管断面の速度分布、液体摩擦に基づく圧力低下が一定になるまでの助走距離を持たない、多くの噴気井内の測定結果からえた経験則である。これは流量測定の際の簡略化として大切な役割を果す。

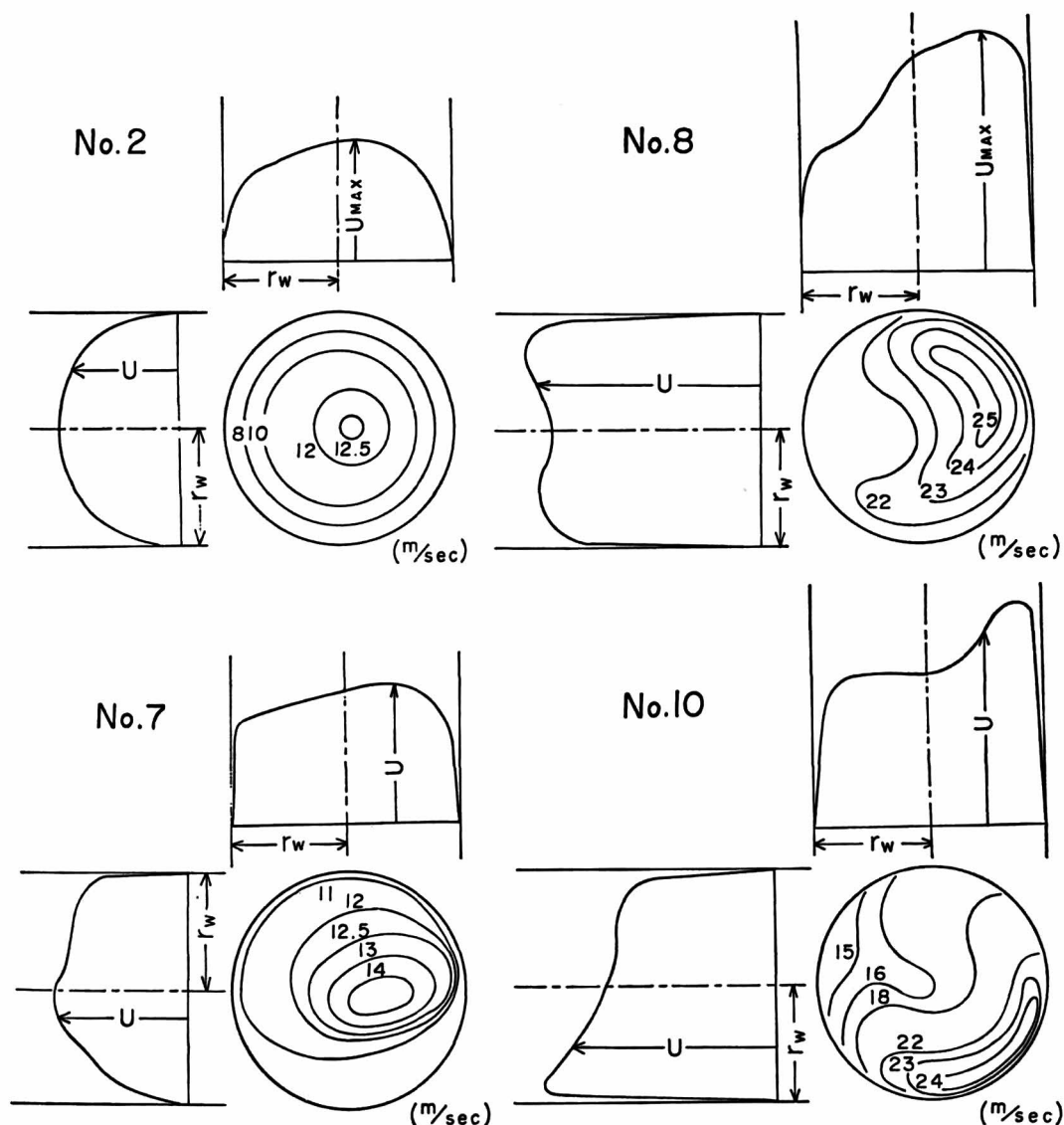


図2 噴気井の出口付近の速度分布と等速度線図

No. 8: 30° の角度をもって 10cm 地表に出ている管の分布である。最大流速の位置は著しく一方の管壁側にかたより、低速度の流体が管軸へ押し出されている。管壁に沿って、管軸に直角方向に二次的流れの存在が認められる。流れは曲管内のそれに類似している。棒を差込んだ所 1.2m 程で突当った。たぶん穴はそこで曲がっているであろう。

No. 10: 図 3 に示されている管出口の流れの状態である。近接して二度 90° に曲げられているため流れは剝離し、渦が各所に生じている。流れは最も不安定である。線図は No. 8 に近似し、流体力学的に興味ある流れ方をしている。

以上のことから、垂直に立てられている管内から噴出される流量は最大速度を測定すればほぼ求められる。しかし、地上において、管の出口付近が曲がっていたり、傾いているような特別の変化が認められる場合は多くの点で速度を測定する必要がある。

No.10

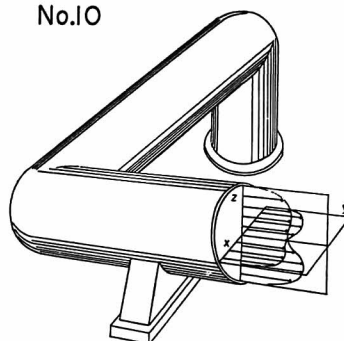


図3 90°連続ベンド噴気井

噴気井の放熱量

1953年の早雲山地送り性崩壊以後、地送り防止として、また、温泉造成用として噴気井が噴気地帯とその周辺に多数掘さくされている。一部はすでに噴気井としての寿命を終えたものもある。図4は箱根の各地点にあるボーリング孔の孔内温度を測定した資料をもとにして、標高0mにおける箱根火山の地中温度分布図である。噴気地帯は等温線100—120°Cの内側に存在する。

表1は1970年11月25日から1971年1月29日の間に測定した、大涌谷、姥子、湯の花、早雲山において大気中に放出されている主な噴気井の噴出状況を整理したものである。温泉は95°Cから150°Cの範囲であり、流速ほど大きな変化はない。このことは地下熱源の大きさや内部構造をある面で規定していると思われる。湿度は温度が高くなるに従って減少し、乾き蒸気に近づく。流量は主に蒸気溜りの大きさと時間の経過による消長に係る。しかし、早雲山No.1の径7.5cmの噴気井に、

図4 箱根火山の地中温度分布図（海拔0m）

- a : 等温線°C, b : 外輪山, c : 噴気地帯,
d : 温泉用のボーリング孔

（大木・平野 1971）

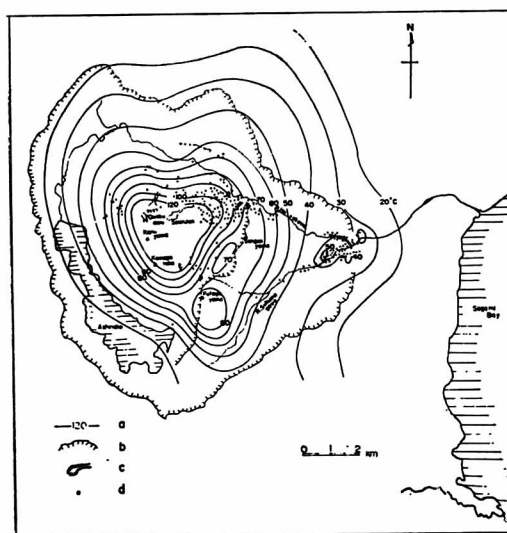


表1 大涌谷, 姥子, 早雲山, 湯の花 噴気井の測定結果

地 区	噴気井名称	口径 (mm)	測定年月日	温度 (℃)	密度 (kg/m ³)	平均噴出速度 (m/sec)	噴出流量 (m ³ /sec)	蒸気量 (kg/sec)	熱水量 (kg/sec)	噴出量合計 (kg/sec)	蒸気熱量 (kcal/sec)	乾き度	湿り度
大涌谷	No. 1	125	1970. 11.25	142.7	2.254	192.2	2.357	5.185	0.127	5.312	3408.0	0.976	0.024
	No. 2	60	1970. 11.25	98.5	2.254	8.2	0.023	0.013	0.039	0.052	12.2	0.248	0.752
	No. 3	80	1970. 11.28	139.2	2.095	20.0	0.100	0.199	0.013	0.212	131.9	0.938	0.062
	No. 4	115	1970. 12. 3	102.2	1.776	18.1	0.188	0.120	0.214	0.334	99.0	0.360	0.640
	No. 5	145	1970. 12. 3	103.0	1.987	39.3	0.648	0.389	0.899	1.288	341.7	0.302	0.699
	No. 6	107	1970. 12. 3	97.5	1.980	12.5	0.112	0.060	0.162	0.222	54.6	0.270	0.730
	No. 7	152	1971. 1.28	117.6	1.622	12.1	0.219	0.225	0.131	0.356	160.5	0.632	0.368
	No. 8	150	1971. 1.28	118.5	1.970	20.1	0.355	0.373	0.327	0.700	279.5	0.533	0.467
	No. 9	80	1971. 1.28	98.5	1.519	10.2	0.051	0.043	0.034	0.077	31.2	0.368	0.632
	No. 10	100	1971. 1.29	149.0	2.500	17.8	0.139	0.345	0.004	0.349	226.8	0.988	0.012
	小 計						4.192	6.952	1.950	8.902	4746.4		
姥 子	F 号	152	1971. 1.11	95.6	1.950	55.4	1.005	0.056	1.454	1.960	461.1	0.258	0.742
早雲山	No. 1	75	1970. 12. 4	98.5	2.345	45.0	0.198	0.111	0.354	0.465	105.8	0.238	0.761
	No. 2		1970. 12. 4	46.2	5.000	67.1	0.381	0.198	1.707	1.905	262.8	0.104	0.896
	No. 3	75	1970. 12. 4	97.2	3.180	10.3	0.045	0.025	0.120	0.145	27.4	0.170	0.830
	小 計						0.628	0.334	2.181	2.515	396.0		
湯の花	国 土	127	1971. 1.18	122.0	2.575	150.3	1.877	2.230	2.603	4.833	1762.0	0.462	0.538

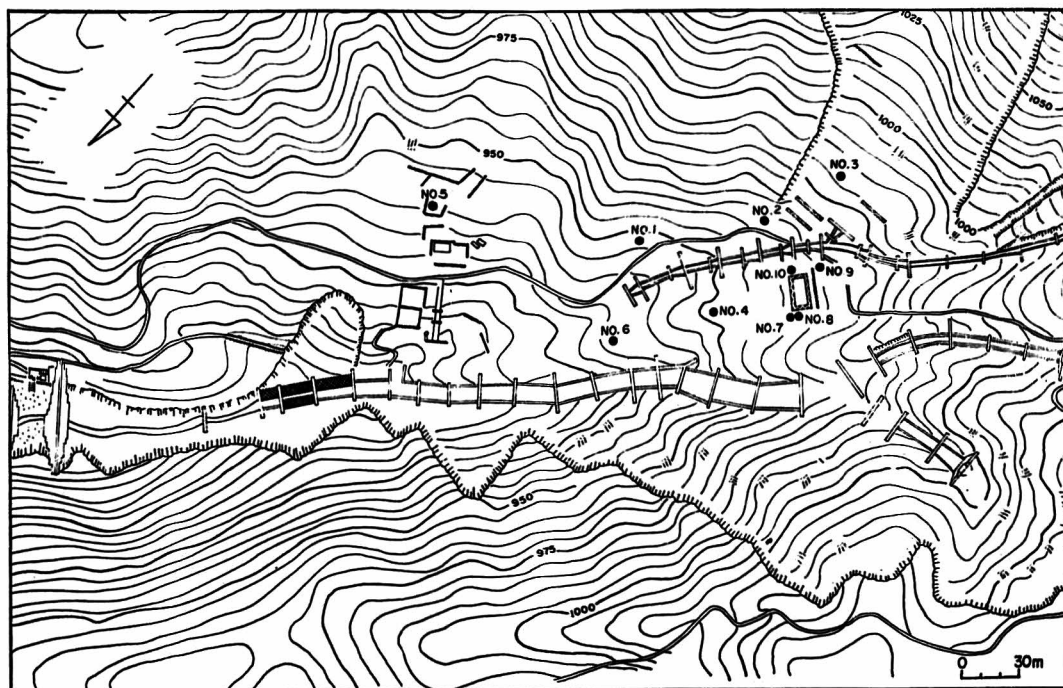


図5 大涌谷の測定噴気井分布図

径5 cm, 長さ1 mの棒を差込んだところ7秒程してから勢いよく棒が飛出し, 流速が15.4m/secから45m/secに急激に変わり, その状態を続けた。圧力増加によって, 孔井の入口か途中にある硫黄などの障害物を除いたことによる変化かと思われる。Larderelloでも, 沈積による孔内の閉塞で流量の減少した例が報告されている。

図5は大涌沢の谷頭にあたる噴気地帯で測定した噴気井の分布図である。1970年9月神奈川県土木部によって掘さくされたNo. 1(深さ77.1m)は他に抜出, 最高速度246m/sec, Mach数0.73を記録し, 圧縮波をとめない, 轟音とともに蒸気を百数十メートル上空に噴上げている。温度計は159°Cを示したが, 噴出蒸気の最高速度をもちいて温度補正を行なった。測定した噴気井10本の噴出量は8.9kg/sec, 放熱量は 4.7×10^3 kcal/sec, 温泉造成に利用されている放熱量(湯原, 1968) 2.16×10^3 kcal/secを加えると, 6.9×10^3 kcal/secになる。そのうちNo. 1の放熱量は50%に当る。なお, No. 1を除くと, この地区における大気放出の噴気井からの放熱量は湯原(1968)の測定値とほぼ同じ値を得た。したがって, 開発が進み, 大きな噴気井が掘さくされるにしたがい, 大気中に放出される熱量は今後も増すものと思われる。

姥子: 噴気井は大涌谷と姥子温泉のほぼ中間に位置する, 深さ192.5mのボーリング孔である。久野(1950)によれば, この付近は箱根火山中央火口丘の火山活動末期の蒸気爆発で欠損した部分に当る。付近には多数の温泉井が掘さくされ, 深さ数100mまでの間に浅・深2層の主要な温泉

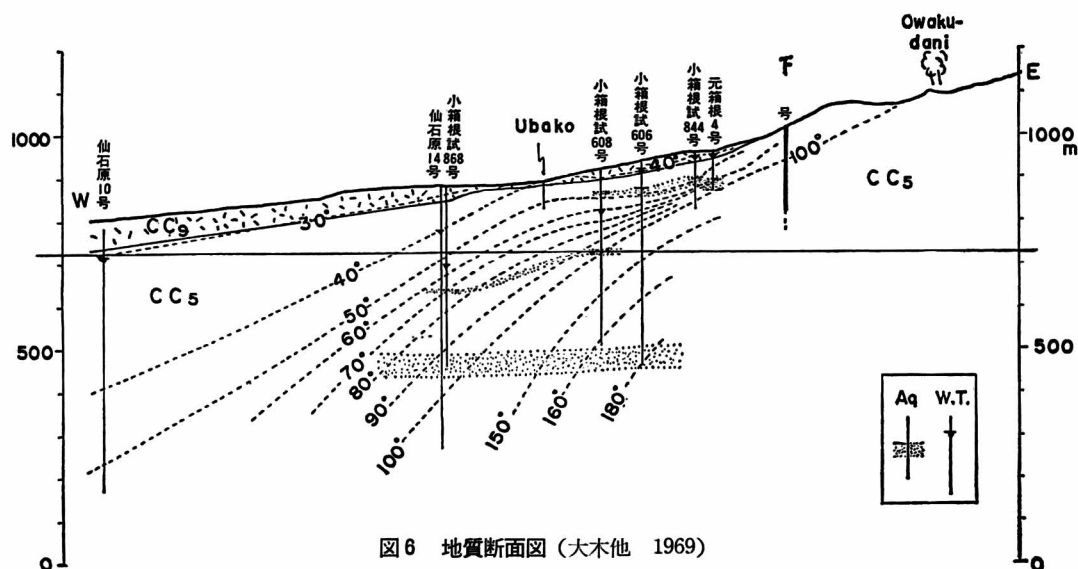


図6 地質断面図(大木他 1969)

帯水層が存在していることが、大木ら(1969)によって明らかにされた。図6の地温勾配から200m付近は 150°C に当る。断熱変化により水蒸気の温度が 150°C から 95.6°C になったと考えると、噴気井の孔底付近の蒸気層の静圧は5.7気圧となる。

湯の花： 湯の花の噴気井は駒ヶ岳南東斜面にあたる硫黄山噴気地帯から300m程下った所にある。1968年に掘さくされた噴気井は湯の花ホテルの暖房などに使用されている。そこから50m程硫黄山より1970年9月深さ200mの噴気井が掘られ、現在大気中に放出されている。この噴気はきわめて水滴の多い蒸気との混合流体であった。第1回目の測定を1970年12月11日に行なった。その後、噴気の出かたが変化したので、1971年1月18日2回目の測定を行なった。表2に示されているように蒸気は乾き、温度は 96.5°C から 122°C 、平均速度は50.4m/secから152m/secと変化している。噴気井出口において蒸気熱量は3.6倍、運動エネルギーは10.5倍の上昇である。地下水位面というより、地下の蒸気の通路や状態変化かと思われるが詳細なことはわからない。更に観測を続ける必要がある。

早雲山： 早雲山における測定場所は温泉造成に利用されているところと、自然噴気地帯の中間に位置する。No. 2は枝管からも噴出しているので本管の径8.5cmを代表して流速を求めた。3本

表2 湯の花噴気井

地 区	測 定 回 数	口 径 (mm)	測 定 年 月 日	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	密 度 (kg/m^3)	平均噴出速度 (m/sec)
湯の花	第 1 回	127	1970. 12.11	96.5	6.43	50.4
	第 2 回		1971. 1.18	122.0	2.57	150.3

表 3 噴気井からの噴出水量と放熱量

地 区	噴 気 状 況	噴 出 水 量 (kg/sec)	放 熱 量 (kcal/sec)
大 涌 谷	噴気井 (大気放出)	8.90	4746.
	" (温泉造成)	11.7*	2160.*
早 雲 山	噴気井 (大気放出)	2.52	396.
	" (温泉造成)	5.9*	680.*
姥 子	噴気井 (大気放出)	1.96	461.
湯 の 花	噴気井 (大気放出)	4.83	1762.
合 計		35.81	10205.

* 湯原 浩三：地熱 No. 16 (1968) による

の放熱量は 3.95×10^2 kcal/sec である。自然噴気地帯からはかなりの量の蒸気が噴出されているので、後日測定の予定である。

大涌谷、早雲山を中心とする噴気井から放出される流出量、放熱量は温泉造成に使用されている分 (湯原, 1968) をあわせると、それぞれ、35.8 kg/sec, 10.2×10^3 kcal/sec である (表 3)。箱根温泉の放熱量 (大木・平野, 1971) は 14.79×10^3 kcal/sec であるから、現在、箱根において地表に放出されている熱量は、 2.5×10^4 kcal/sec となる。大涌谷 No. 1 は全放熱量の 13.6% を占める。

ま と め

i) 噴気井管内の蒸気はきわめて複雑な流れ方をし、境界層が中心に達し、速度分布が一定になるものは少ない。最大速度 $U_{\max}$ と平均速度 U との関係は、

$$U = (0.85 \pm 0.06) U_{\max}$$

であらわされる。

ii) 箱根中央火口丘を中心とする噴気地帯とその周辺、ならび、箱根全山の温泉からの放熱量は、

噴 出 の 変 化

噴出流量 (m^3/sec)	蒸気量 (kg/sec)	熱水量 (kg/sec)	噴出量合計 (kg/sec)	蒸気熱量 (kcal/sec)	乾き度	湿り度
0.638	0.336	3.767	4.103	487.	0.081	0.919
1.877	2.230	2.603	4.833	1762.	0.462	0.538

2.5×10^4 kcal/secである。なお、熱伝導による地表からの自然放熱などのものを考えあわせると、箱根火山の地下深所の熱源から供給されている熱エネルギーは 3×10^4 kcal/sec と推定される。

謝 辞

東京大学水上武名誉教授、工学院大学流体力学研究室の山内邦比古教授、赤羽正彦助手からは有益な御意見を頂いた。神奈川県温泉研究所大木靖衛所長、平賀士郎研究科長からは終始温かい激励を頂いた。温泉研究所久保田博管理課長、荻野喜作主任研究員、小椋藤幸技師、広田茂技師、横山尚秀技師は調査に色々協力された。以上の方々に厚く御礼申し上げる。なお、この調査の費用はすべて神奈川県衛生部の箱根温泉蒸気調査研究費によった。

参考文献

- 藤田武助 (1966), 流体力学, 養賢堂.
- 福富孝治, 須川明, 小林丈二, 徳永英二, 和田昭夫, 和気徹 (1966), 北海道アトサス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, 第16号, 61—80.
- KNUDSEN, J. and D. KATZ (1958), Fluid dynamics and heat transfer, McGraw Hill.
- KUNO, H. (1950), Geology of Hakone Volcano and adjacent areas, Part I. Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sec. II, Vol. VII, Parts 3—5, 257—279.
- 日本機械学会 (1967), 水力学および流体力学, 機械工学便覧.
- 大木靖衛, 荻野喜作, 平野富雄, 広田茂, 大口健志, 守矢正則 (1968), 箱根強羅温泉の温度異常上昇とその水理学的考察, 神奈川県温泉研究所報告, 第6号, 1—20.
- 大木靖衛, 荻野喜作, 広田茂, 小鷹滋郎, 小沢清, 平賀士郎, 河西正雄, 平野富雄, 田嶋縊子, 岩田義徳 (1969), 箱根姥子温泉報告調査, 神奈川県温泉研究所報告, 第8号, 1—12.
- 大木靖衛, 平野富雄 (1971), 箱根火山の温泉 (印刷中).
- ŌKI, Y. and T. HIRANO (1970), Geothermal System of Hakone Volcano, United Nations Symposium in Pisa, 1970, (in press).
- 佐久間修三 (1957), “乱れ” としてみた火山の煙, 火山, 第2集, 第1巻, 第1号, 1—8.
- 沢田照夫 (1969), 熱力学, 森北出版.
- 清野政明 (1959), 噴気現象の考察 (その1), 火山, 第2集, 第3巻, 第2号, 128—135.
- 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, 22—27.
- ROWE, M. (1970), Measurements and computations of flow in pipe bends, J. Fluid Mech., Vol. 43, part 4, 771—783.
- 湯原浩三 (1964), 別府周辺噴気孔の噴出熱量と熱力学的性質, 大分県温泉調査会報告, 第15号, 15—25.
- 湯原浩三 (1967), ラルデレロにおける地熱の探査・開発, 地熱, No. 12, 3—20.
- 湯原浩三 (1968), 地熱地域からの放熱量の測定法および箱根大涌谷, 早雲山における実測例とそれより推定した熱水系, 地熱, No. 16, 25—43.
- 湯原浩三 (1968), 箱根火山の噴気活動とその熱源について, 火山, 第2集, 第13巻, 第2号, 74—83.
- 湯原浩三, 瀬野錦蔵 (1969), 温泉学, 地人書館.