

天然蒸気の密度測定

湯原 浩三

1. 天然蒸気

古い火口や火山々麓などのあるところでは 地面でお湯が沸騰したり 水蒸気が噴き出したり あるいは噴き出した泥を坊主の頭のように丸くふくらましていたりしているところがある。ここでは 岩石は変質して全体に白っぽくなっており ところどころに昇華した硫黄が沈着しており 草木は育たず 荒涼とした裸地になっている。このようなところを 日本では昔から ”地獄“ と呼んでいる。学問的には solfatarous field というが この語は Napoli の西郊にある Solfatara から由来したものである。Solfatara は2千年以上も噴気活動をしている火口であって 今も 約 150℃の水蒸気を盛んに噴出している。普通名詞の solfatarata は硫気孔と訳されていて 亜硫酸ガスや硫化水素などを噴出する孔をさし 一方主として水蒸気を噴出する孔を噴気孔 (fumarole) といっている。さて solfatarous field から噴出しているものは 第1表に示すように 主として水蒸気であって数%の炭酸ガスや硫化水素などのガスと まれにごく微量の固形物 (泥) を含んでいる。したがって たとえ硫黄の沈着が目立つことがあるにしても solfatarous field にあるのは ほとんど噴気孔であって solfatarata は少ない。

噴気のほとんどは H₂O である。しかし必ずしも水蒸気ではない。水蒸気は無色透明の気体であるのに 地獄からはもうもうと白煙が上っている。われわれがみているのは 湯気 すなわち微細な水滴の集りである。この水滴はちょっと考えると 水蒸気が地上に噴き出し

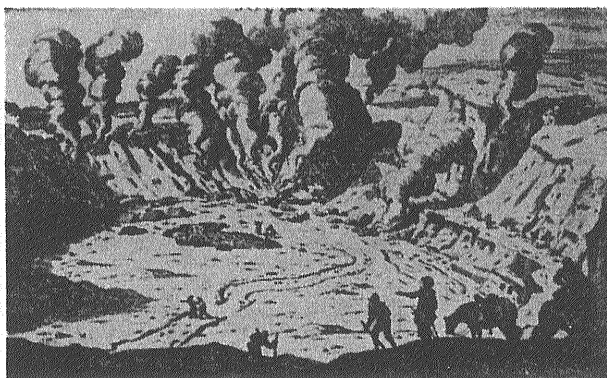
第1表 噴気の性質

| | 温度 C° | H ₂ O % | H ₂ O 以外のガス | | | |
|-------------|----------|-----------------------|------------------------|------------------|-----------------|-----|
| | | | SO ₄ | H ₂ S | CO ₂ | その他 |
| 十勝岳新噴 | 144 | 94.6 | 53.1 | 9.4 | 27.9 | 9.6 |
| 那須茶白山 | 530 | 98.0 | 8.9 | 35.2 | 48.1 | 7.8 |
| 箱根大涌谷 | 144 | 98.4 | 13.8 | 25.9 | 58.8 | 1.5 |
| 雲仙小地獄 | 97 | 98.2 | — | 9.1 | 88.9 | 2.0 |
| 霧島島地獄 | 97 | 99.5 | — | 34.1 | 63.4 | 2.5 |
| Solfatarata | 149 | 80.4 | — | 0.9 | 98.7 | 0.4 |

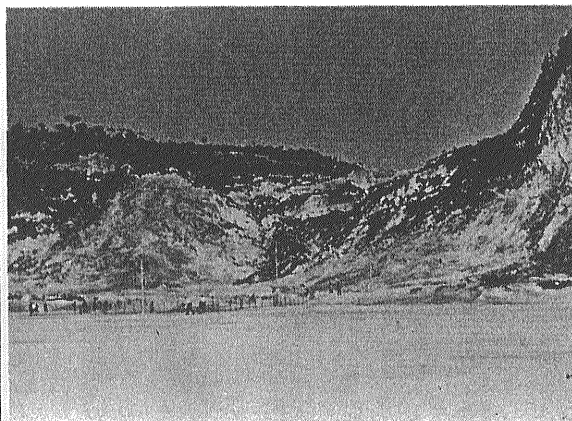
てから冷却して水滴になったものと思えるから ごく簡単には 地獄や solfatarous field からは水蒸気が噴出しているということになる。しかし 細かく観察してみると水蒸気が地上に出てきてから冷却して水滴になる場合のほかに はじめから微細な水滴を含んだ水蒸気 すなわち 湿り蒸気が噴き出している場合が多いことがわかる。しかも 水滴を含む割合はいろいろであって それによって天然蒸気を分類すると だいたい次の5種類に分けられる。①

1. 過熱蒸気
 2. 乾き飽和蒸気
 3. 見掛乾き飽和蒸気
 4. 霧状湿り飽和蒸気
 5. 水混り飽和蒸気
- } 湿り飽和蒸気

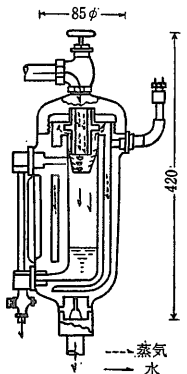
水が沸騰するときは その時の圧力によって 沸騰温



第1図 17世紀の Solfatarata



第2図 現在の Solfatarata



第4図 分離乾き度計

度すなわち飽和蒸気温度がきまる。沸騰によって生じた水蒸気が飽和蒸気曲線によってあらわされる圧力と温度を保ったままで出てくれば乾き飽和蒸気となる。過熱蒸気はその圧力での飽和蒸気温度よりも高温の蒸気であって具体的には飽和蒸気をさらに加熱するか温度を下げずに圧力だけ下げたときに得られる。飽和蒸気がわず

か冷却して水蒸気のごく1部が微細な水滴になった状態では熱力学的には湿り飽和蒸気であるが含まれる水滴の量が少ないので実際上は“湿った”という感じは全くない。これがここで見掛乾き飽和蒸気と称したものである。この場合水滴は地表へ噴出後直ちに蒸発して再び水蒸気になってしまふであろう。水滴の量が多くなると噴出後蒸発してもなお水滴として残り周辺を濡らす。この状態を霧状湿り飽和蒸気となぜけた。しかしこの程度ではまだ水として流れ出るほどの水量はない。さらに水量が多くなると噴気孔の周辺ではあたかも雨が降っているような状態になる。これが上述の第5の状態である。このように水蒸気と共に噴出する水量が多い場合は水蒸気が冷却して水滴になったというだけでは説明できなくて沸騰面から水蒸気と熱水がいっしょに吹き上げられているかあるいは途中から混入した地下水が吹き上げられているかのどちらかである。

上のような水と水蒸気の混合状態をあらわすのには工学上は湿り度あるいは乾き度を用いる。すなわち1kgの湿り飽和蒸気がxkgの乾き飽和蒸気と(1-x)kg

の水滴とからなり立っているときにxを乾き度(1-x)を湿り度という。また湿り飽和蒸気の平均的な密度も水と水蒸気の混合割合をあらわすのに用いることができる。湿り飽和蒸気1kg中に密度 ρ'' の水蒸気がxkg ρ' の水滴が(1-x)kgあるときの平均密度を ρ とかくと乾き度と密度の間には

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

あるいは

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

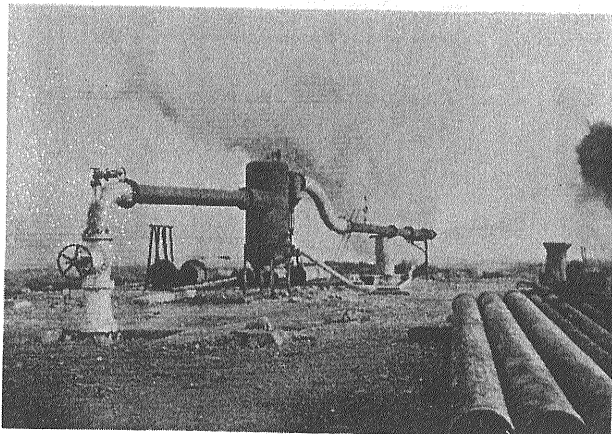
の関係がある。

天然蒸気の密度は上に分類した5つの状態に対応して g/cm^3 の単位で 10^{-4} から 10^0 の範囲で大きく異なっている。したがって密度がわかれば天然蒸気がどのような熱力学的状態で噴出しているかさらにその水蒸気がどのような熱的過程を経てきたかということについて1つの情報が得られるわけである。たとえば過熱蒸気や乾き飽和蒸気が噴出しているときには蒸気の噴出途中で自然に湿り度を低めるような“絞り効果”や加熱過程があったことになるしあるいは蒸気の起源がもともと過熱蒸気の状態である場合もあるかもしれない。水を多く含む蒸気が噴出しているところでは地下の沸騰面が浅い場合もあるであろうし地表近くの地下水が噴気孔にどんどん浸入している場合もあるであろう。

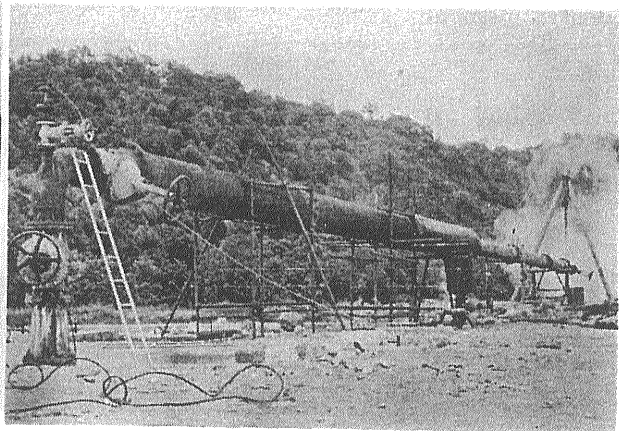
2. 蒸気密度測定法

水滴と水蒸気の混合流体である天然蒸気の密度あるいは乾き度を測定する方法としては

- 汽水分離法
- 熱量計法
- 直接計量法
- 絞り湿り計法
- 電気容量法
- 加熱法



第3図 (a) 垂直型汽水分离器



第3図 (b) 軸型汽水分离器

β線法 γ線法

などがある。これらの方法は いずれも一長一短で 目的と 噴気の噴出状態によって 適 不適がある。

(1) 汽水分離法

噴出する水量が多いときには 汽水分離器によって分離した水と水蒸気を別々に計量することができる。水蒸気を大きっぱに乾き飽和蒸気とみなすと その密度は 蒸気表からわかるから 混合流体の密度も容易に計算できる。細かくみれば 分離後の水蒸気中にもなお水滴が含まれているが 噴出水量が多いときには このための影響は無視できるほど小さい。

蒸気の1部を小型の汽水分離器に導いて測定する装置に 分離乾き度計^② (第4図) というのがある。

(2) 熱量計法

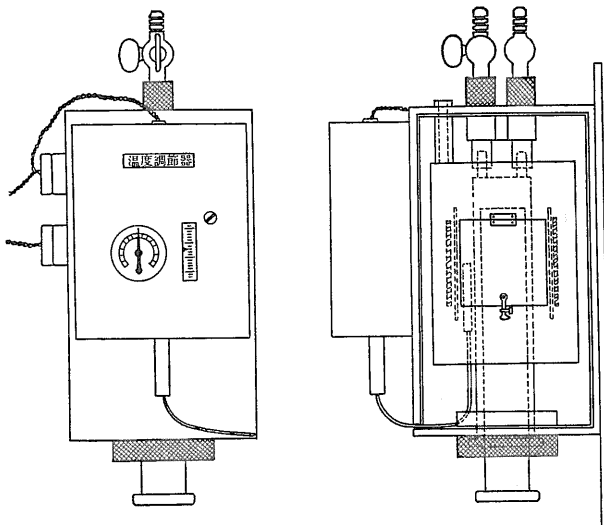
これは一定量の水中に蒸気を吹き込んで 水量の増加と水温の上昇を測定して それから乾き度を求める方法である。はじめに水温 t_0 °C の水が m_0 kg あって そこへ t_1 °C の蒸気を吹き込んで 水量 m_2 水温 t_2 になったとすると 蒸気の乾き度は水の比熱を c 蒸発の潜熱を h_1 として

$$x = \frac{m_0 c (t_1 - t_0) - m_2 c (t_1 - t_2)}{(m_2 - m_0) h_1}$$

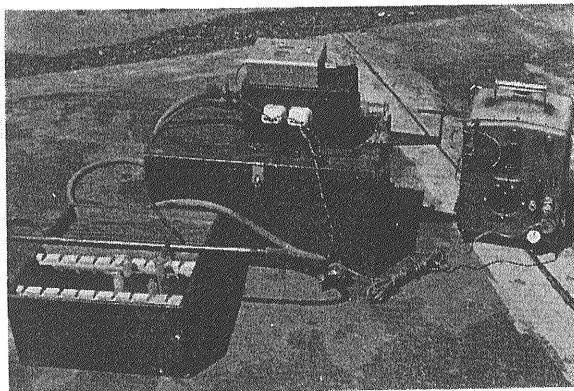
で計算できる。

(3) 直接計量法

これは できるだけ孔口の条件に等しい条件で 一定容量の蒸気を取り 其の重量を計る方法であって^{①③} 噴気孔には特別な装置を何も必要としないので 天然の

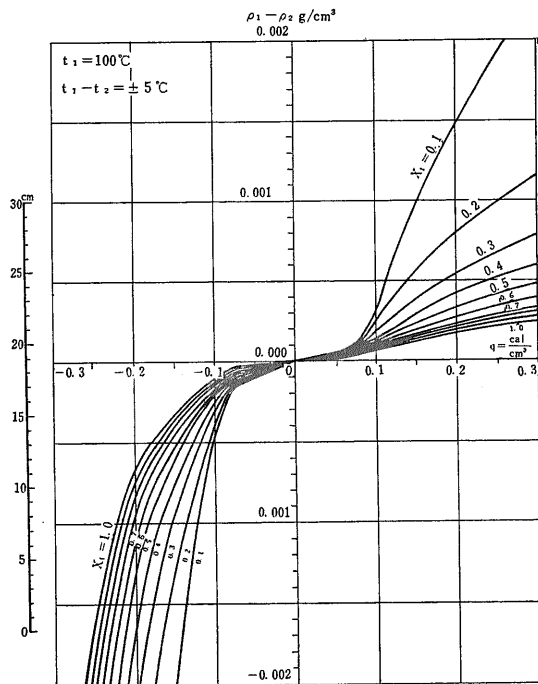


第6図 蒸気採取管と恒温層 (特殊技術課 竹内技官製作)

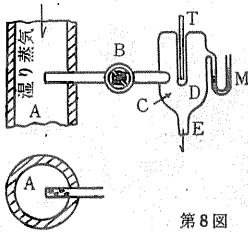


第5図 蒸気採取装置

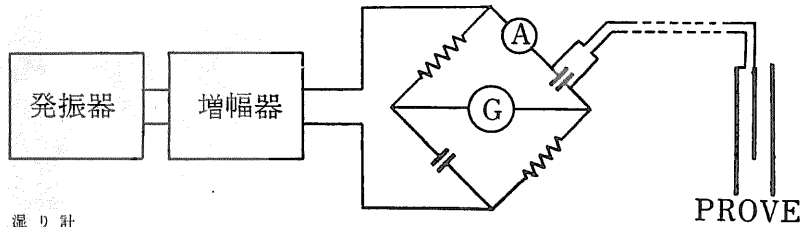
噴気孔やきわめて簡単な噴気井で 迅速かつ容易に測定することができる。蒸気を取りするには 採取管の温度が孔口の温度と等しくなるように恒温槽内で行なうがもし採取管の温度が蒸気温度より低ければ 圧力をいくら初めに等しくしておいても 蒸気は採取管の中で凝縮し そのために圧力は低下して 蒸気がさらに採取管内に流入する。採取管の温度の方が高ければ逆になる。このように採取管の温度が噴気温度と完全に等しくないための誤差の1例を示したものが第7図である。この図では 採取管を収容した恒温層の温度が 蒸気の真の温度より5°C高いかまた低い時に 採取管内に出入する熱量を横軸にとり そのための密度の誤差を縦軸にとって示してある。すなわち 横軸は 温度の調節が不完



第7図 直接計量法の誤差曲線の1例: 縦軸は誤差の絶対値 横軸は採取管に出入する熱量



第8図 絞り湿り計



第9図 電気容量法

全な恒温層内に滞在する時間に対応するものである。結局 この方法では よい条件のもとでも 約10%程度の誤差は避けられない。しかし他の方法でも 今のところ やはり同程度の誤差は考慮しなければならないようである。

(4) 絞り湿り計法

蒸気が断面積の急に狭くなった所を通過すると 圧力が下がる。また Joule-Thomson 効果によって温度も下がるけれども その下がり方は少ないので 近似的には等エンタルピー変化として取り扱える。したがって絞りを通過すると 湿り蒸気は乾き蒸気に変化するので 通過後の乾き蒸気の測定から 通過前の湿り度を求めようというのが絞り湿り計または絞り乾燥度計である。だからこれは 乾き度のあまり小さくない飽和蒸気の乾き度を求める測定器である。第8図のAは蒸気管でここから1部の蒸気を抽出し 開閉弁Bを通してノズルCから噴出させる。そうすると絞り作用のために圧力は低下する。D室に入った蒸気の圧力 p_2 を水銀マンネーターMで読み 温度 t_2 を温度計Tで測る。Dの蒸気は絶えずEから放出されて定常状態が保たれるようにする。絞り通過前の乾き度を x 飽和水のエンタルピーを i_1' 蒸発潜熱を l 絞り通過後の圧力 p_2 に対する乾き飽和蒸気のエンタルピーと飽和温度をそれぞれ t_2 t_{s2} とすると

$$x = \frac{i_2 - i_1' + C_{pm}(t_2 - t_{s2})}{l}$$

ここに C_{pm} は平均等圧比熱である。

ことなく 手軽に測定できるという利点がある。しかし実際は 混合流体は均質な媒質ではなく 両極間にある水滴の位置 分布状態によっても電気容量は変化するので 蒸気の乾き度と電気容量の関係を理論的に知ることが困難である。それ故に あらかじめ電気容量と別の方法で求めた乾き度との間に 計算曲線をつくっておく必要がある。

(6) 加熱法

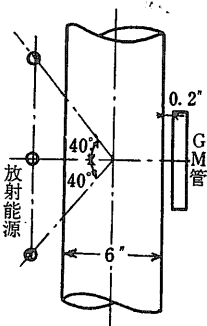
蒸気の中にヒーターを入れ 電流を流して熱を発生させると 蒸気の湿っている間は 水滴を蒸発させるために熱が使われて温度が上がらない。発生熱量と温度上昇の関係から 蒸気中にある水滴の量が求められる。◎これがこの方法の原理である。

(6) β 線法 γ 線法

β 線 γ 線が水と水蒸気の混合流体を通過するとき吸収によってその強さが減衰することを利用して含水量が測定できる。◎第10図のように蒸気の流れるパイプの直径方向に放射線源とGM管を向い合わせて配置し測定する。放射線源としては 半減期の長いこと 隔壁を透過するに十分な強さをもっていることが必要であって γ 線源としては Sb^{125} が β 線源としては Sr^{90} あるいは Y^{90} が適当である。 Sb^{125} から出る γ 線吸収法によって測り得る下限は 水の厚さにして約0.1インチでそれより水量が少ない場合は β 線吸収法が適している。第2表はパイプが空の時 水で満たされている時 20%の水が均一に分布している場合の γ 線計測の例である。吸収係数によって水量を求める場合 散乱の影響を無視したために生じる誤差は高々10%程度である。

(5) 電気容量法

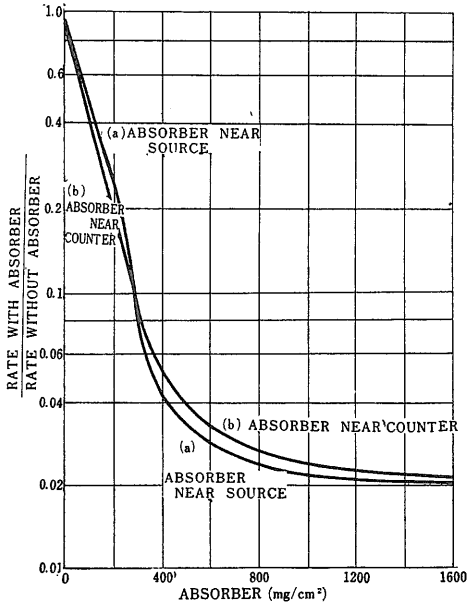
水蒸気と水滴の混合流体を1つの電媒質とみなすと その乾き度によって電媒定数が異なるので これを蓄電器の電気容量の変化として測定することができる。第9図は測定原理を示す電気回路の1例であって◎蒸気の流れをあまり変える



第10図 γ 線法

第2表 γ 線吸収法の計測例

| | Counts/min | | |
|-----------|------------|---------|---------|
| | パイプ空の時 | 20%均一分布 | パイプ充滿の時 |
| Primary | 13,360 | 10,870 | 5,130 |
| Scattered | 1,180 | 1,200 | 670 |
| 合計 | 14,540 | 12,070 | 5,800 |



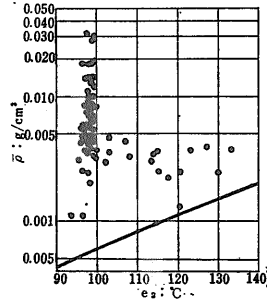
第11図 ABSORBER による COUNT RATE の減少

第11図は標準アルミニウム absorber をβ線源の近くとGM管の近くに置いたときのそれぞれの計測値の変化であってもしパイプ内に水と水蒸気の混合物が一樣に分布していれば a b 両曲線の間にくる。この曲線を用いると GM 管の計測からパイプの中の absorber の密度がわかる。

この方法では放射能源と検出器の位置をいろいろ変えてやればパイプ内の水滴の分布も知ることができ汽水分離器などの分離効果をたしかめるのにも利用できる。

3 蒸気密度の分布と地熱地域の熱水系

実際の噴気孔について蒸気密度を測定してみると

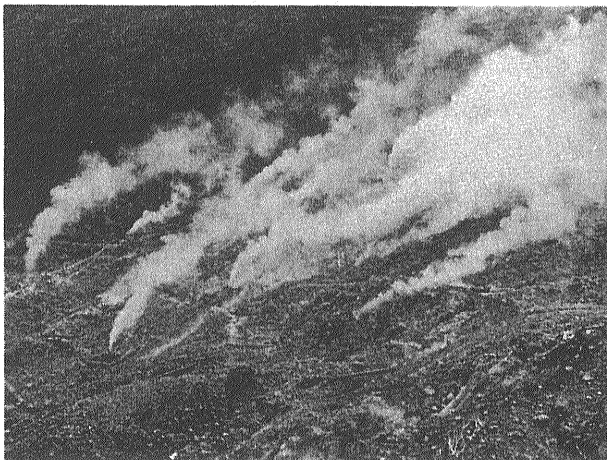


第14図 天然蒸気の密度と温度の関係

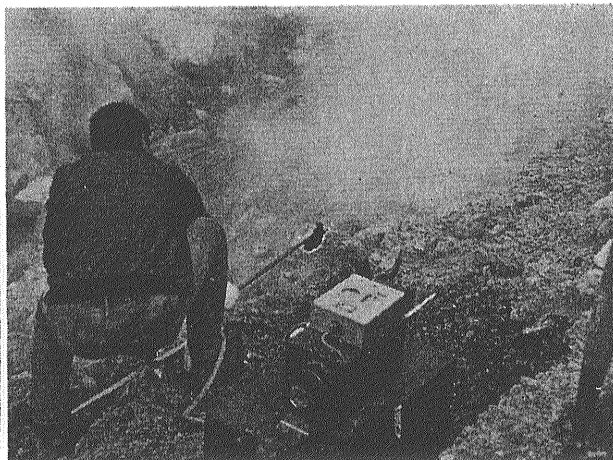
個々の噴気孔で密度の値は非常にちがっている。たとえば別府温泉周辺では蒸気の密度は0.001~0.032 g/cm³ 大涌谷では0.0001~0.122 g/cm³ の範囲であった。第14図は温度と密度の関係を示したものであって100℃以下の蒸気では乾き飽和蒸気に近いものからかなり多くの水を伴って噴出しているものまで範囲は広い。100℃以上のものは一般的には100℃以下のものより密度は小さいが飽和蒸気曲線より上にあるものも多くこれらは温度が高くてもわずかではあるが水滴を含んでいるようである。

このような密度のちがう蒸気すなわち含水量の異なる水蒸気が地理的にどのように分布しているかをみるとたとえば別府の例では第15図のようになって地域的な特長はほとんど認められなくて狭い範囲内いろいろな蒸気が存在していることがわかる。⑤したがってこのような天然蒸気の熱力学的性質のちがいは蒸気の起源に関するような本質的なちがいによるのではなくてむしろ比較的地表近くの蒸気の通路における熱的・水理的な条件に左右されているものと考えられる。

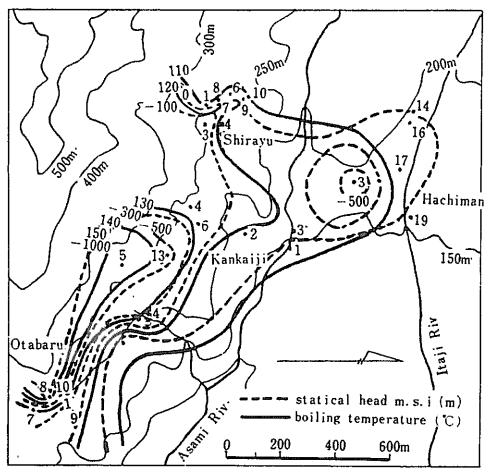
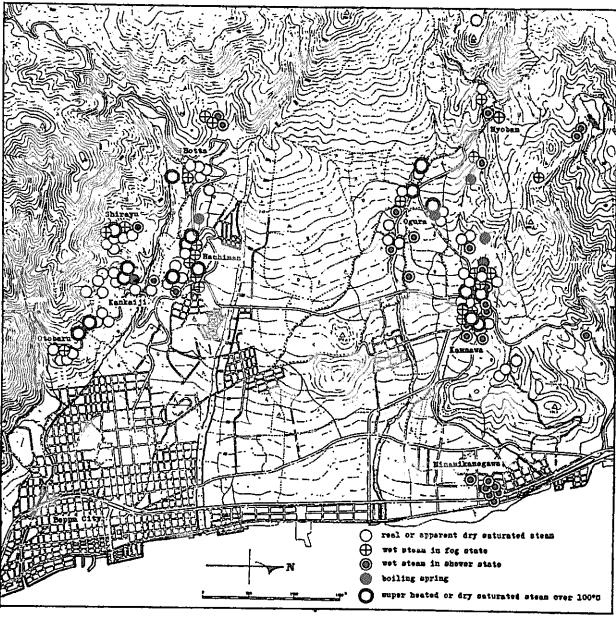
天然蒸気の熱力学的性質やそれらの分布は地熱地域での熱と水の流れすなわちその熱水系を推論するのに役立つであろう。たとえば1つの試みとして蒸気



第12図 箱根大涌谷の噴気孔



第13図 直接計量法による測定状況

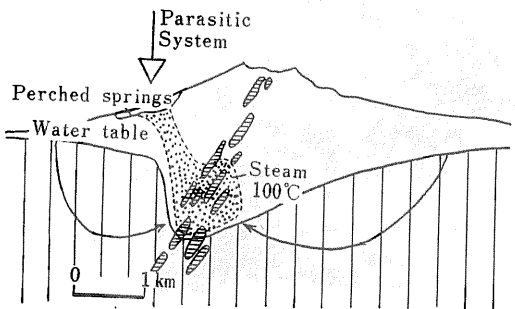


↑第16図 蒸気の性質から計算した沸騰温度と熱水の静止水頭 (別府西方の例)

← 第15図 別府周辺噴気孔の分布と熱力学的性質

はすべて熱水が地下で沸騰したものであると仮定して簡単なモデルを用いて 沸騰温度 沸騰深度 熱水のもっている本来の圧力 (静止水頭) を計算してみると 別府の場合 第16図に示したような結果が得られた。沸騰温度は102℃から177℃ 熱水の静止水頭は 地表面いずれのものから深さが1000m以上のものまであったがとくに興味深いのは 温泉地から遠ざかって高所になるにつれて 沸騰温度は高くなり 静止水頭が深くなる傾向にあることである。このことは 噴気地帯の地下にある熱水が 別府温泉の方へ流れ出しているというよりもむしろ逆に 温泉水が噴気地帯の方へ流れこんでいることを暗示しているのかもしれない。この点は さらにニュージーランドの Tongario 火山々麓にある Ketatahi 温泉について描かれた想像図 (第17図) ⑥ と比べてみてはなはだ興味深い点である。

以上 天然蒸気の密度あるいは含水量について 測定方法やその地球物理学的な意義について概説したが 実のところ このような測定は従来あまり行なわれていな



第17図 ニュージーランド Tongario 火山々麓にある Ketatahi 温泉の熱水系について描かれた想像図

い。しかし 第1表を見るまでもなく 噴気の90%以上は蒸気であるので 残りの数%にあたる噴気ガスについての研究も必要であるが 大部分を占める蒸気を見逃がすことはないであろう。天然蒸気についてより進んだ研究が盛んになることが望まれる。

(筆者は 国立防災科学技術センター流動研究官 応用地質部併任)

文 献

- ① 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 pp. 15-25
- ② 森芳太郎 1967 : 松川地熱地域開発上の問題点 地熱 No. 10 pp. 52-64
- ③ 湯原浩三 1966 : 箱根大涌谷からの放熱量 火山学会 1966年 秋季大会講演
- ④ 友定 彰 : 未発表
- ⑤ Yuhara, K. & Tomosada, A. 1965 : Thermodynamical Properties of Natural Steams and Hydrothermal Structure of Beppu Geothermal Area, Special Contributions, Geophy. Inst. Kyoto Univ. No. 5 pp. 33-44
- ⑥ Belin, R. E. & Knox, F. B. 1955 : The Estimation of the Distribution and Quantity of Water in Two-Phase Steam-Water Systems New Zealand Jour. Sci. Tech. Vol 37, No. 3 pp. 385-395
- ⑦ Elder, J. W. 1966 : Heat and Mass Transfer in the Earth: Hydrothermal System New Zealand DSIR Bul. 169