

昭和 45 年 12 月

原 著

天 然 過 熱 蒸 気 に つ い て

京都大学地球物理学研究施設 吉 川 恭 三

(昭和 45 年 2 月 1 日受理)

Superheated Steam in Hydrothermal Area

Kyozo KIKKAWA

Geophysical Research Station, Kyoto University

Observations of natural steam have often shown temperatures higher than 100°C at the orifices of fumaroles or bored wells in various hydrothermal areas. This steam is called superheated steam. Thermodynamic condition of the natural steam has often been assumed as reversible adiabatic change in the course of the flow in a subsurface layer or bored well. This shows the conservation of entropy and possibly leads to an incorrect conclusion that the superheated steam cannot originate from saturated steam with liquid thermal water but from originally superheated steam.

It is, however, found that deep bored wells in such areas discharge the thermal water of sodium chloride type which is considered as the most possible origin of subsurface steam. Dynamic condition of the subsurface flow of steam is generally treated in a form similar to Darcy's equation, in which the velocity is proportional to the pressure gradient. This condition essentially founds on the equilibrium of the forces including the friction of flow and is contradictory to the conservation of entropy. Darcy's equation is then possible to be transformed to the thermodynamic condition of the conservation of enthalpy. The highest value of enthalpy of the steam in the state of equilibrium with deep thermal water is 669.7 cal/g at 240°C. It corresponds to that of the superheated steam of 163°C at the pressure of 1 atm. This temperature is expected to be the highest value of the natural steam which ascends from the region of thermal water to the ground surface. Such a high temperature has not been noted prior to this report.

1. ま え が き

かなり高温の温泉を湧出している地域の背後には、噴気や沸騰泉をふくむ地熱域の存在している例が多く、温泉の生成機構を考える時、まづその水蒸気の由来や地層中での流動状態に眼を向けられるのは当然である。この問題は Allen と Day のイエローストーン公園の温泉に関するすぐれた研究以来、過去数十年にわたり研究者の興味をひいてきた。しかし、そのような地熱域の深部にまで試錐の行なわれる機会が少なかったため、過去の多くの研究は地表近くに現

われた噴気や熱水だけを情報源として熱力学的にまたは力学的な推理の展開から地下の性状を推定する試みに終始してきた。

近年、温泉地の発展や地熱利用への欲求は温泉孔の乱掘という弊害をもたらした反面、このような噴気地域の地下状況に格段の知識を提供し、現在は各分野の研究者がこれらの資料にもとづいて過去の論議をこえ、新たに地熱地域の地下構造をえがきつつある段階と考えられる。したがって、各研究者にとって、その分野で行なわれた過去の研究のうちにはもはや捨て去られ今さらいわずもがなものも多いことであろう。しかし、やや違った専門分野のこととなると、この傾向はなかなかつかめず、やはりこれまでに書かれているものを通して知識を求める以外に方法がない。その意味で各分野ごとに現状に立っての過去の諸説への批判と将来への立脚点の記述が望まれる。

天然過熱蒸気の由来についての問題は、著者の周囲においてこの20年間、常に判然としないままむしろ議論されてきたものである。この論文ではこれらの議論を整理し、現状にふさわしい形で地層中の水蒸気流動につき基礎的な取り扱い方法を考えたい。

2. 問題の提起

おもに山岳部に見られる地熱域では自然噴気孔が群集し、地表近くで酸性熱水をつくと共に多量の水蒸気を噴出している。これらの蒸気の多くは地表での沸騰点である 100°C 近くの温度を示すが、時にその噴気群中の数孔でより高温の過熱蒸気が観測されることがあり、九重山、河原地獄で 115°C 、雲仙、清七地獄で 117°C が測定されているのはその一例である。そのような地熱域周辺に穿掘された噴気井ではこの現象はさらに顕著で、孔口圧での沸騰点をかなり超えた高温蒸気の噴出がしばしば報じられている。別府温泉でも山下は1949年の調査で最高 141°C までの過熱状態の噴気を観測し、¹⁾ 湯原もその後の測定で、²⁾ それらの過熱度が孔口圧測定の誤差の程度をはるかに超えていることから、明らかに過熱蒸気存在することを認めている。その他、昭和新山などの明らかに火山性と考えられるものを除いても、温泉と直接関係のありそうな地域での過熱蒸気の例は日本をはじめ世界各地の地熱域で多数報告されており、同時にその由来につき多くの議論が行なわれた。その議論には二つの流があり、一つは地中における過熱蒸気存在をマグマ性熱源の直接作用に結びつけようというもので、他は地中で液状の熱水と共存していた飽和水蒸気が上昇流動に伴う摩擦熱のため過熱状態になったという説である。前者は温泉の熱源を研究する多くの人たちにより支持されてきて、瀬野、湯原は地層中の水蒸気流動にも可逆断熱変化すなわちエントロピー保存の近似がなりたつとし、³⁾ 地表に過熱蒸気が現われるためには地中の圧力下でははるかに高温でなければならず、途中でマグマ性熱源から加熱を受けない限りとても液相からの由来は考えられないとしている。後者の摩擦熱の影響は Mazzoni 等によりその可能性を述べられているが、⁴⁾ その量的な考察については著者は知らない。これに関連した説として、Adams は⁵⁾ 熱力学におけるジュールトムソン効果から、地層中の流動で水の昇温がおこり温泉の熱源の一部となり得ると述べた。すなわち、細孔栓を通過して高圧から低圧へ気体に移る場合にエンタルピーは保存され、その時、理想気体なら温度は変わらないが水だと昇温するというに基づいている。しかし実際には液体の水でおこり得る温度上昇はごく少ないため、温泉の熱源としてあまり重要視されなかった。湯原は同じくエンタルピーの保存される過程として絞り効果を用い、⁶⁾ 水と蒸気の混合流体につき湿り蒸気が乾き蒸気になってゆく過程を説明しようとした。しかし、細孔栓実験のような

特別な実験過程をそのまま野外現象に適用するには飛躍があり、絞り効果にしても、ある一点での絞りという不連続な効果が全流路の力学過程に果している役割を見つけることがむづかしい。深部熱水の蒸発、沸騰による飽和水蒸気が地表の過熱蒸気に至る途中で何段階にも考えられねばならない細孔栓とか絞りの熱力学的効果を水蒸気流動の力学過程に結びつける試みがぜひとも必要である。またこれを通じて前記のような流動に伴なう摩擦熱との関係も明らかにされるに違いなく、この論文の一つの目的はここにある。

つぎに、地層から穿堀井に入った流体の状態変化についても、従来の研究には上記の二つの取り扱い方法の混乱がうかがわれる。沸騰泉の研究の第一歩は福富により開かれ⁶⁾、湯原、友定もこれを応用して地下熱水のポテンシャルを求めようとした⁷⁾。これらには実際に適用するための近似がかなり取り入れられているが、その主旨は、井管内での流量連続の式、摩擦項を含まないベルヌーイの流動方程式と流体のエンタルピー保存の式の三つを連立させたものである。吉川は⁸⁾、流動方程式で摩擦を無視できるような状態ならば可逆断熱過程の近似が成り立つと考え、上記のエンタルピー保存のかわりにエントロピー保存の状態を与えて解析を行なった。噴気井については瀬野、湯原が⁹⁾、力学的には管壁との間の乱流摩擦を考慮しながら、状態方程式としては理想気体のエントロピー保存を用いて取り扱っている。一方、管内のガス流動におけるエネルギー連続の考からは、断熱的という仮定のもとではその摩擦の程度にかかわらず運動エネルギーの変化を補償するようにエンタルピー変化のおこることが知られるが、実際に一般の噴気井ではこの変化の程度は小さく、それが保存されるという近似のもとで噴出蒸気のエンタルピーから孔井に入る前の地下熱水の温度を推定する試みが普通に行なわれている。

以上を通覧すると、地中より地表へ、高圧下より低圧下への水蒸気流動を取り扱う場合に、おもに地球物理学系の研究者が可逆断熱過程の近似を支持し、理想気体としてエントロピー保存の近似や、摩擦を含まないベルヌーイ式に執着してきた感じがある。これはたぶん、この流動過程を数理的に書き表わし量的な考察を行なうのに簡単だという理由があったに違いない。しかし、これをある狭い範囲ではなりたつという近似にとどめずかなり長い流路にまで適用した時、先に記した瀬野、湯原の説のように、過熱蒸気が存在する地下には非常に高温の蒸気を想定しなければならなくなる。

一方、近年既存温泉地の背後や山岳部地熱地域の深部に試錐が進み多くの資料を提供した結果、いわゆる火山性の温泉や噴気の由来について次のような状態が大ざっぱではあるが既に定説化しようとしている。すなわち、そのような地域の深部には NaCl 型の中性熱水が広く分布しており、それから水蒸気が分離して上昇噴出したものが噴気や地表近くの酸性温泉水をつくる一方、熱水が地層中の圧力下で液状のまま地下水に混合しつつ流動して山麓部の温泉を形成しているとの考である^{11), 12)}。これに基づき、水量、熱量と化学成分の三つの見地から、中性熱水の生成、保給やその貯留、流動の機構が現在の温泉研究における主題となりつつある。この状態からみて、中性熱水以深の問題は一まづおくとしても、熱水層以浅に存在する過熱蒸気の由来がまた問題となってくる。かなり多くの地熱域で、自然噴気孔や穿堀井を問わず、そのような過熱蒸気の不規則な分布が報告されていることからみて、ただその噴気にだけ液状の熱水を経過しないマグマ由来の過熱蒸気が集中しているとは考えにくい。また、従来噴気地帯に掘られた試錐の多くは深部の熱水層から沸騰泉を得ているが、地表からそこに至るまでに特に熱を供給しそうな高温層は認められておらず、この範囲の水蒸気に対して中性熱水以上の熱源を

求めることはむづかしい。そこで、先に記したように、熱水由来の水蒸気が地層中を流動中に過熱状態となってゆく機構をくわしく検討する必要がうまれる。

3. 水蒸気の流動とエネルギーの式

まず一般的な一つの流管内の定常的な流れを考えることにし、重力場で地表に向い垂直上方への流動をとり扱い、外部との熱の授受はないものとする。この時、流管内の流量とエネルギーの連続から、流体単位質量当りによく知られた次の関係が求められる¹³⁾。

$$\frac{d}{dz} \left(A \frac{w^2}{2} + U + A p v \right) = -A g$$

ここで w は流速で、流体単位質量の持つ内部エネルギーを U 、比体積を v 、圧力を p とし、 g は重力加速度で A は熱の仕事当量の逆数である。これにエンタルピー H について、

$$H = U + A p v$$

の関係を入れて次のように書き変えられる。

$$\frac{d}{dz} \left(A \frac{w^2}{2} + H \right) = -A g \dots \dots \dots (1)$$

これは断熱状態での流動では、その過程での摩擦損失の有無に関わらず常に用いられる関係である。

次にオイラーの運動方程式から、流体の単位質量につき、それにはたらく摩擦力を F_u とし、次式が得られる。

$$\frac{d(w^2/2)}{dz} + v \frac{dp}{dz} = -F_u - g \dots \dots \dots (2)$$

(1) から (2) を引き、エントロピー S についての、

$$dH = T dS + A v dp$$

の関係を代入して、

$$T \frac{dS}{dz} = A F_u \dots \dots \dots (3)$$

すなわち、摩擦のある時には必ずその摩擦力に抗して流動する仕事に比例したエントロピーの増大が伴なわれる。

以上は管内など比較的速度の大きい流動の場合であったが、地層中の空隙とか割目を流れる流体については、その粘性摩擦のため (2) 式中の運動エネルギーの項が無視できる程度に小さくなり、流体にはたらく圧力勾配による力と重力と摩擦力 F_u の三力が釣り合いにあるという関係が多くの場合に適用できるとされている。この流動は層流状態であるから摩擦力は流速に比例すると考えられ、三力の釣り合いについて、たとえば空隙のある媒体中を流れる流体単位体積につき、

$$\frac{\mu}{k} q = - \left(\frac{dp}{dz} + \rho g \right)$$

が与えられる。 ρ は流体の密度、 q は媒体単位面積を通過する流量で、この媒体の空隙率を ϕ とすると、 $q = \phi w$ の関係にある。 k は媒体の透水係数、 μ は流体の粘性係数で、上式はよく知られたダルシー法則に当る。これを流体単位質量当りに書き変えると、

$$\frac{\mu v}{k} q = - \left(v \frac{dp}{dz} + g \right) \dots \dots \dots (4)$$

左辺は流体単位質量にはたらく摩擦力であるから、(3) 式に代入して、

$$T \frac{dS}{dz} = A \frac{\mu v}{k} q = - A \left(v \frac{dp}{dz} + g \right)$$

$$\therefore \frac{dH}{dz} = - Ag \dots \dots \dots (5)$$

$A = 2.4 \times 10^{-8}$ cal/erg を考える時、 z の数 100 m 程度までの範囲では右辺の値は熱エネルギーの変化としてはほとんど無視でき、上記の断熱的という仮定の下では、地層中を流れる流体のエンタルピーはほぼ保存されるとみてさしつかえない。すなわち、ダルシー法則など地層中の細隙における流動方程式では流体の粘性にもとづく摩擦力が主要な役割を果しており、流れがあれば必ずエンタルピーは増大してゆきその結果としてエンタルピーがほぼ保存されるという関係が導かれる。したがって、運動方程式としてダルシー法則を用いる限り、これに可逆断熱過程の状態方程式を連立させることは理論的には不合理である。Muskat の著書で¹⁴⁾、砂層中のガス流動をとり扱う上の代表的な例として、理想気体についての等温過程と可逆断熱過程をあげてあるが、後者はこの見地からは成立せず、それは単にポリトロプ変化過程としての近似的なとり扱い方法を示すものと解釈した方がよさそうである。

以上から、地層中の水蒸気の流動過程に断熱状態を仮定する限り、その状態は(5)式のエンタルピー保存という条件でおさえられ、その水蒸気が地表の大気圧下に噴出した時に示すべき温度の上限もそれから規定される。

4. 過熱蒸気の上限度

この論文の主要な目的は地下深部に液相として存在している熱水から出発した流体が地表でとり得る最高温度の推定である。それにはまず、熱水層からの出発点で流体の持つことのできるエンタルピーの最高を求めねばならない。その流体としては水と蒸気の両方が考えられるが、一般に水蒸気は水より潜熱に相当するだけ高いエンタルピーを持つから、熱水層から分離した流体のうちではその温度における飽和水蒸気のエンタルピーがもっとも高く、それに液体が共存するほど低くなる。したがって熱水由来の噴気のうち地表で最も高い温度を持ち得るのは、熱水の蒸発や沸騰による水蒸気だけが熱水から分離して上昇し、液相は地層中にとり残されつつ流動してゆくような状態に違いない。蒸気表によると、飽和蒸気のエンタルピーは図1に示すように、230~240°C で最高で、それより温度が低くても高くても減少するから、地中で液相と共存していた水蒸気のエンタルピーはこの240°C における669.7 cal/g を最高値とするとみてさしつかえない。

つぎにこの飽和水蒸気が地表へ噴出するまでの経路で他の熱源から熱を与えられないとすると、もしダルシー法則の適用範囲外の(1)式のように運動エネルギーの増加が無視できぬよう

になった場合や、地層中での熱伝導による冷却が加わった時など野外で予想される諸条件はすべて流体のエンタルピーを減少させる方向であるから、地表に出てきた時の温度を最高にするのは(5)式のようにエンタルピーがその全経路でほぼ保存される状態を保ってきた場合に違いない。完全にこのような状態である時には、地中で 100°C 以上の熱水から分離した水蒸気は地表の1気圧下ではすべて過熱蒸気として噴出する。これからゆくと、比較的上昇速度が小さくてダルシー法則の範囲内にあると考えられる自然噴気孔では、穿掘井におけるよりも特によく過熱蒸気が観測されそうなのに一般にその例が少ないのは、地中特に浅層での浸透水との接触や熱伝導による冷却の効果が大きいためであろう。従来、自然噴気で過熱状態の観測された例は、密集した噴気孔群中の一小孔からの噴気だけで、周縁部の噴気温度は飽和点にあったことからこの状態が推察される。

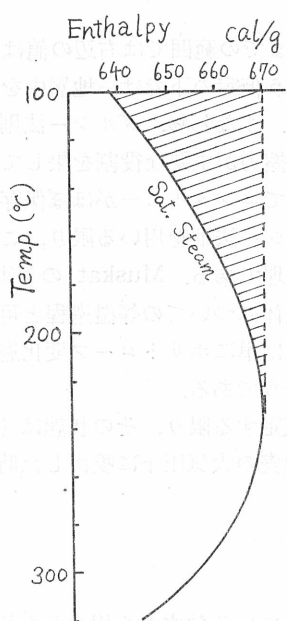


図 1. 各温度における飽和水蒸気のエンタルピー。斜線部は過熱蒸気存在範囲。

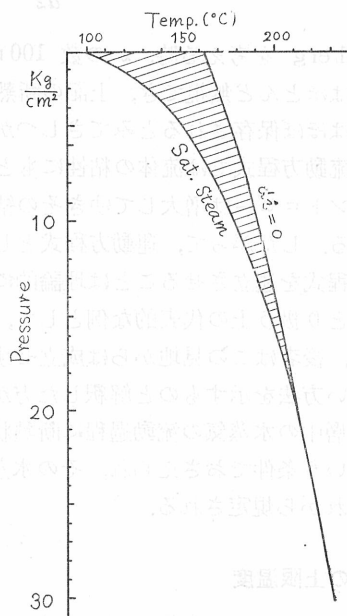


図 2. 熱水から分離した水蒸気のとりに得る最高温度。斜線部は過熱蒸気存在範囲。

以上から、液相としての熱水を経過してきた水蒸気の持ち得る最高のエンタルピーは 669.7 cal/g であることが知られ、それから図 2 に示すように各圧力の下での最高温度が求められる。たとえば地表で1気圧とした時、その最高温度はほぼ 163°C で、それ以下の温度の噴気はたとえ過熱状態であっても、地下では液相として存在していたと考えてさしつかえない。逆にそれ以上の温度であれば、その水蒸気自身がマグマ由来のものであるか、または上昇途中でマグマ性の熱源から加熱されたかのどちらかを考えねば説明できない。筆者の知る限り、昭和 新山のように明らかに火山性熱源の残留効果の認められるものや、一部の硫気孔を除いて、温泉地背後の地熱域でこの上限温度より高温の過熱蒸気が報告された例はなく、このことから、地熱地域の地下に液相として熱水が広く分布しているとの推定がかなり一般的に適用でき

るものと考えられる。

このように液相由来の過熱蒸気が存在する範囲に穿堀された噴気井では、(1)式のようにその上限温度の推定に流量の値が加わってくる、このことから逆に各噴出温度に対する流量の上限を求めることができるが、これはまた別論文に記す。また、熱水層から水蒸気だけを分離して湧出させ、残りの熱水は地層中にとどまって流動を続けるとした場合に、その沸騰に要する潜熱の供給機構について疑問が残るに違いない。地下に熱水は広く分布していても、過熱蒸気のみられるような噴気地域はその中の特定範囲に集まっているのが普通である。このことと熱水層における潜熱供給機構との関係、ひいては地層の水理性質が熱水流に与える影響について、今後研究を進めつつ、別論文に発表したい。

5. ま と め

(1) 地層中の流動でダルシー法則またはそれに類似の、流速が圧力勾配に比例するという関係式が適用される範囲では、流体の粘性による摩擦のためエントロピーが増大を続け、可逆断熱変化としての近似は適用できない。この場合、流体のエンタルピーは保存され、これまで一部で考えられてきた地下における細孔栓や絞りの効果をも包含する。

(2) したがって、地下で熱水から分離した飽和水蒸気も上昇して圧力が下るにつれ過熱蒸気となり得る。熱水由来の水蒸気が持ち得る最大エンタルピーは 669.7 cal/g で、これはたとえば1気圧下では 163°C の過熱蒸気に当り、これを熱水由来の噴気の最高温度とみることができ、地表でこれより高温の過熱蒸気が認められれば、地下にマグマ直接由来の熱源を考えねばならない。

参 考 文 献

- 1) 山下幸三郎：大分県温泉調査研究会報，**1**，(1950)。
- 2) 湯原浩三：同上，**15**，15~25 (1964)。
- 3) 瀬野錦蔵，湯原浩三：噴気孔について，九電研究所，(1957)。
- 4) Mazzoni A.：トスカーナの噴気とラルデロ発電所，九電研究所訳，(1954)。
- 5) Adams L. H.：Jour. Geol. **32**，191~194 (1924)。
- 6) 福富孝治：地震，**14**，(1942)。
- 7) Yuhara K. and A. Tomosada：Special Contrib. Geophys. Inst. Kyoto Univ.，**5**，33~44 (1965)。
- 8) 吉川恭三：温泉工学会誌，**4**，10~18 (1966)。
- 9) 瀬野錦蔵・湯原浩三：火山，3集，**5**，1~8 (1960)。
- 10) 吉川恭三・由佐悠紀：大分県温泉調査研究会報，**18**，1~8 (1967)。
- 11) 湯原浩三・古賀昭人：同上，**12**，15~22 (1961)。
- 12) 露木利貞：鹿児島大理科報告，**10**，65~83 (1931)。
- 13) 藤本武助：流体力学，養賢堂，86~87 (1965)。
- 14) Muskat M.：The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media. McGraw-Hill. (1937)。