

温泉現象の地球科学的研究の過去・現在・未来

由 佐 悠 紀¹⁾

Earth Sciences of Hot Spring Phenomena- Past · Present · Future

Yuki YUSA¹⁾

1. 明治～昭和初期の調査研究（地質構造と温泉）

1845年のアイスランド・ヘクラ火山の噴火に伴い、デンマーク政府の依頼によって1846年にBunsenが行った現地調査が、温泉現象の近代的科学研究の嚆矢とされる。しかし、欧米諸国では、温泉に対する関心が高くなかったこともあって、その他の地球科学的研究はあまり行われなかったようである。わが国においては、明治初期の1870～80年代に政府主導による温泉調査が全国的に実施された（福富，1936；服部，1959）。他方、上諏訪温泉（長野県）や別府温泉（大分県）では、早くも温泉井の掘削が始まった。おそらく、世界でも最初期の温泉井であったと思われる。

続いて、温泉地の地質学・地理学的研究が行われるようになった。その成果の一つとして、全国の温泉分布図の完成が挙げられる。温泉と第四紀火山の分布域とが重なり合うことが指摘され、火山性温泉の概念が明確になった。また、温泉湧出地と地質学的構造線とがよく対応することも見出された。1930年代頃には、地殻変動と温泉分布との関連を考察した地球物理学的研究が萌芽した（福富，1936）。

近年に至り、この方面の研究は、物理探査法の発達に伴って、より広域の地下構造・変動との関わり合いの研究へと展開している。

2. 温泉水の起源

温泉水の起源の解明は、温泉研究の初期からの中心的課題であったが、適切な手法がなかったため、なかなか進展しなかった。ただ、1940年代に、処女水の検出を目的として、別府温泉において重水素濃度測定が試みられたことは特記に値する。水素・酸素などの安定同位体を用いた水の起源に関する研究は、質量分析装置の開発によって、1950年代以降格段に発展し、温泉水のほとんどは

¹⁾ 京都大学名誉教授 〒606-8501 京都市左京区吉田本町。 ¹⁾ Kyoto University, Emeritus Professor, Yoshida Honmachi, Sakyo, Kyoto 606-8501, Japan.

循環水(天水)であることが明らかとなった(松葉谷, 1991).

この結論は, 温泉資源が有限であることを意味し, 温泉の適正な開発利用に当たって, 流域水収支評価の重要性が認識された.

3. 泉温の変化

泉温が時間的に変化することは, 古くから知られていた. 1920 年代以降, 浅虫温泉(青森県)や別府温泉において, これに関する系統的な観測が行われるようになり, 気温・湧出量・降水量などとの関係が調べられた. 重要な様相は湧出量との間に見られる正の相関である. その主原因は, 温泉水が湧出管を上昇する途中での冷却効果として, 説明された(福富, 1936; 湯原・瀬野 1969). この方面の研究は, 温泉の熱源の研究に向かった.

近年(1970 年代以降)深層掘削によって得られた非火山性温泉において, 汲み上げ量と泉温とが連動するという, 前記と同様の現象が現われる.

4. 湧出量(温泉水位)の変化-地下水理学的研究

海岸地域の自噴泉では, 上げ潮(下げ潮)時に湧出量が増加(減少)するという, 潮汐の影響が知られていたが, 1930 年代に別府温泉で行われた観測によって精度の高いデータが得られ, 海岸から離れるほど湧出量の変化幅は小さくなるという, 変化の空間分布の様相が明らかになった. また, それらのデータから, 気圧上昇(下降)時に湧出量または静止水頭が低下(上昇)するという, 気圧変化の影響が抽出された. さらに, 降雨の影響も検出され, 自噴泉においては, 降雨後に湧出量が増加するが, その度合は海岸で小さく, 海岸から離れると大きくなることが知られた(福富, 1936; 湯原・瀬野 1969).

他方, 新たな温泉の開発によって, 既存温泉の湧出量が減少(静止水頭が低下)するなどの影響が現れることは経験的に指摘されていたが, そのメカニズムの解明を目指して, いくつかの温泉地で揚水試験が実施された(湯原・瀬野, 1969).

以上のような自然的・人為的要因による変化に関する一連の研究は, 一般地下水理学の発展に寄与するとともに, 温泉開発への指針を提供することとなった.

5. 原温泉水(原熱水): 地熱-温泉系

ある温泉地では, しばしば, 泉温と塩化物イオン濃度との間に直線関係が認められる. その明瞭な例は, 1930 年代に上諏訪温泉, 次いで下河津温泉(静岡県)で得られた. これらによって, 高温・高成分濃度の原温泉水(原熱水)の存在, および, 原温泉水と冷地下水との混合による温泉系の形成機構が示唆された(福富, 1936; 湯原・瀬野 1969).

近年, 世界各地で実施された地熱調査において, それぞれの地熱-温泉系を涵養する Na-Cl 型熱水の存在が認められ, 各地熱-温泉系は基本的に, 原熱水と地下水との混合によって形成されていると理解されるようになった. ただし, 各系の形成過程では, 地下における熱水の沸騰や蒸気の凝縮(相変化)などの複雑な現象も生じる. 多くの観測例や熱力学的考察に基づき, 地熱-温泉系は熱水卓越型と蒸気卓越型に大別されることが知られた. それらの系を構成する温泉水(熱水)・蒸気・二者の混合物などは, 一括して地熱流体(または地熱水)と呼ばれる(湯原・瀬野, 1969; 大木, 1992).

6. 地熱-温泉系の総合的モデリング

地熱-温泉系における静止水頭(温泉水位)の観測およびコンピュータによるシミュレーションにより、次のような流動のあり方が明瞭となった。(1) 水平方向には高地部から低地部へと流動し、(2) 鉛直方向には、高地部では浅部から深部へ、低地部では深部から浅部へと流動する。すなわち、広域的な地熱-温泉系では、高地部は水の涵養域、低地部は流出域である(湯原・瀬野, 1969; 西村, 2004)。

下方に高温領域が存在するような系では、熱対流を示唆する温度分布が観測された。また、液相と気相が共存する二相流系の存在も見出された(湯原・瀬野, 1969; 大木, 1992)。他方、温泉の基本的な3つの泉質、すなわち、塩化物泉・硫酸塩泉・炭酸水素塩泉の存在は、二相流系に対する有力な証拠と理解される。この泉質形成過程をも含めた地熱-温泉系の総合的なモデリングが進展している。

7. 溶存物質の起源-プレートテクトニクスにおける温泉現象

温泉の泉質を決める溶存物質の起源は、究めて興味深い重要な研究課題である。これについては、一つにはプレートテクトニクスによる地球現象の理解の深化、二つには質量分析装置を始めとする分析機器の発達により、解明への道が開かれつつある(巽, 1995; 大沢, 2006)。今後の研究の進展が期待される。

本稿を終えるに当たり、将来の課題をいくつか挙げる。

温泉現象を通しての熱及び物質フラックスの評価

温泉地の地下熱構造の観測研究

沈み込み帯における流体の性状と流動過程の解明

(マグマの発生・超臨界状態・相変化・地熱流体の発生など)

沈み込み帯における物質循環の解明

温泉系の発達過程の解明

各温泉地の水収支評価(特に資源保護の観点から)

主な引用文献(単行本のみ)

大木靖衛(1992): 温泉, 横山泉ほか編「火山」, 231-244, 岩波書店, 東京。

大沢信二(編)(2006): 温泉科学の新展開, 234頁, ナカニシヤ出版, 京都。

巽 好幸(1995): 沈み込み帯のマグマ学, 186頁, 東京大学出版会, 東京。

西村 進(編)(2004): 温泉科学の最前線, 236頁, ナカニシヤ出版, 京都。

服部安蔵(1959): 温泉の指針, 425頁, 廣川書店, 東京。

福富孝治(1936): 温泉の物理(岩波科学文献抄12), 98頁, 岩波書店, 東京。

松葉谷治(1991): 熱水の地球化学, 139頁, 裳華房, 東京。

湯原浩三・瀬野錦蔵(1969): 温泉学, 293頁, 地人書館, 東京。