

平成8年9月

日本温泉科学会第49回大会

特別講演

温泉の起源  
(塩素の起源に関して)

京都大学理学部地球物理学研究施設

由佐悠紀

Origin of Hot Spring, with Reference to Origin of Chlorine

Yuki YUSA

Beppu Geophysical Research Laboratory, Kyoto University

Abstract

It is generally thought that chlorine in hydrothermal waters is originated from magmatic emanation. However, the source of chlorine in magma is not elucidated yet. The Cl budget of the Beppu hydrothermal system (situated on the Japan island arc), whose age is estimated to be about 50 ka, indicates that the Cl flux from the deep amounts more than 90% (12x10^3 ton/year) of the total Cl discharge (13x10^3 ton/year) from the system. In connection with the large Cl flux, the Cl circulation between the ocean and the land accompanied with the subduction of the oceanic plate may be important. A Cl isotope study should be intensively developed.

1. はじめに

19世紀の中頃に行われたBunsenによるアイスランドの温泉調査が、温泉の科学的研究の嚆矢とされる。以来、温泉の起源、すなわち、熱の起源・水の起源・物質の起源は、それぞれに対して研究の進展に応じた描象が与えられながら、常に問い直され続けてきた。論ずべき事柄は多岐にわたっており、概観さえもできそうにない。そこで、我々が取り組もうとしている課題である物質の起源、具体的には温泉水の主要成分である塩素(以下、Cl)の起源に関わる問題を述べたいと考える。

## 2. 従来の研究の概観

温泉水の主要成分であるClの起源は、旧くから多くの研究者により論じられてきた。たとえば、別府温泉では、温泉の湧出温度とCl濃度の間には直線的な関係のあることが知られ、NaCl型の熱水(源温泉水)の存在が仮定される一方、現海水あるいは過去に地層中に閉じ込められた海塩にその源を求めようとする試みがなされた<sup>1)</sup>。

他方、1950～1960年代頃より世界各地で推進された地熱調査によって、火山・地熱地域には普遍的に、別府温泉と同様なNaCl型の熱水が分布していることが明らかとなった。すなわち、熱水のClの起源が地球規模の大きなテーマとして登場したと言える。

よく知られているように、一般的な見解はマグマ発散物中のHClである。これに対し、H<sub>2</sub>O-NaCl系の高温高圧実験によって、かなりの量のNaClが蒸気中に移ることが実証され、この機構でClの起源を説明することも試みられた。他方、岩石からの溶出とする見解もある。

この問題と関連して、別府では、変質・未変質の火山岩類のCl含有量が分析され、変質岩ではClが著しく溶脱されていることが知られた。山下は、この結果に基づいて別府地熱系のCl収支を評価し、岩石からの溶出だけで4,000年程度はまかなえたとした<sup>2)</sup>。しかし、熱水系の年齢に関する我々の知識が不足していたこともあって、それ以上の吟味はできなかった。

このように、HClであれ、NaClであれ、あるいは岩石中のClであれ、マグマ起源ということではいずれの見解も共通していると考えられる。

であるならば、この問題は解決済みか？ 決して、そうではない。ここで問題としたのは、その向こうの起源、すなわちマグマのClの起源である。どこから来たのか？

## 3. 別府温泉からの問題提起

最近、別府では、NaCl型熱水の通路にKが濃縮されていることが見いだされ、これを用いて別府熱水系の年齢が約10万年と推定された<sup>3)</sup>。この推定には不備な点があり、訂正された年齢は5万年程度である<sup>4)</sup>。

他方、別府地熱系からのCl流出量は $13 \times 10^3 \text{ ton/year}$ と見積られている<sup>5)</sup>。また、この地熱系のモデル化にも若干の進展があった。これらに基づき、Cl収支の再評価が行われた<sup>6)</sup>。評価は、2つの極端な場合を想定して行われた。

### 【Case-A】

変質地帯の面積を低地扇状地(25km<sup>2</sup>)と想定する。また、その厚さは、南部域で見積られたCl型温泉水流動層の厚さ(160m)<sup>7)</sup>のほぼ2倍の300mとする。ちなみに、ポーリングによって、NaCl型熱水の側方流動が確かめられている<sup>8)</sup>。Clの溶出量は、山下<sup>2)</sup>と同様に、非変質岩の濃度(408ppm)と変質岩の濃度(86.6ppm)との差とする。これが、岩石から供給されるClの極少量である。このときの可能継続年数は、わずかに440年でしかない。

### 【Case-B】

別府地熱系のモデル<sup>9, 10)</sup>を参照して、山岳部の地下に、大きな変質領域(面積16km<sup>2</sup>: 厚さ3 km)を付け加える。Clの溶出量は、非変質岩石の濃度すべてとする。これが、岩石から供給されるClの極大量である。このときの可能継続年数は、4,000年と見積られる。

このように、Case-Bの場合でさえ、岩石中のCl量は5万年間の流出量をまかなうことはでき

ない。

一方、ClとのペアであるNaは、Case-Bで非変質岩石の保有量が34億トン、5万年間の流出量が4.5億トンと見積られた。したがって、岩石からの溶出と別の供給過程は必ずしも必要ではない。

以上のように、Cl流出量に対する岩石からの溶出量の寄与は小さく、深部から1年間に $10^4$  tonものClフラックスがなければつじつまが合わない。もちろん、この収支計算はいくつかの仮定のもとになされたものである。しかしながら、深部からの推定フラックスがCl流出量の90%を越えるほどに大きいことからみて、量の大小は別にしても、定常的なフラックスを考えなければならないように思われる(図1)。

このCl流出が数万年も続いてきたとすれば、その供給源をどこに求めたらいいか? この試算からも、熱水のClの起源の問題が重要課題として浮かび上がってきた。

まずチェックすべきは、Clの巨大な貯留体である海洋との関わりである。関わりがあるにしろ無いにしろ、このことを確かめなければ、先に進むことはできないであろう。

陸域の火山・温泉地域は、アフリカの大地溝帯などを除けば、ほとんどすべてがプレートの沈み込み域にある。

この沈み込みに伴い、海水を含む海底堆積物が地下へと引きずり込まれ、そのClがマグマ発散物の一部をなし、それが熱水のCl源となるというのは、吟味するに足る魅力的な物質循環像である(図2)。

この課題を究明するためには、新たな研究方法が必要である。手法の一つとして、Clの同位体研究が挙げられよう。

研究を進める方法として、つぎの2段階戦略が考えられる。

1. まず、 $^{35}\text{Cl}$ と $^{37}\text{Cl}$ の安定同位体を調査する。これに関する研究は少ないので、基礎資料の集積から始めなければならないであろう。分析の対象となる試料は、自然界のClを含有する全ての物質である。
  - 現海水、化石海水、深部熱水、温泉水、地下水、降水などの水試料。
  - 火山ガス、地熱ガスなどの気体試料。
  - 未変質・変質の各種火山岩、堆積岩をはじめとする岩石類。

気がかりなのは、この分析が現在の技術で可能か、あるいは、この問題を吟味できるほどの

Duration of geothermal activity : 0.049Ma

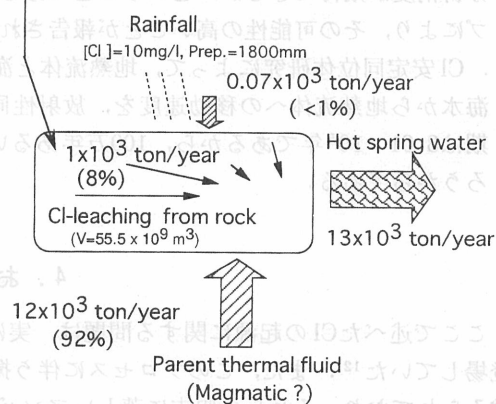


図1 別府地熱地域における塩素の収支

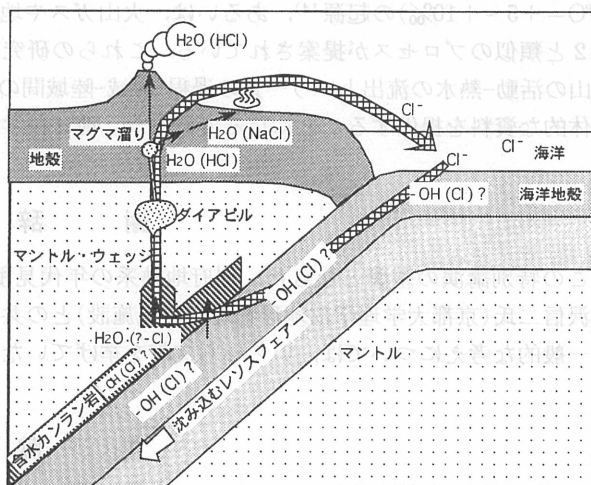


図2 島弧における海洋-陸域間の塩素循環に関する模式図

分析精度が期待できるか、ということである。これについては、近年、アリゾナ大学のグループにより、その可能性の高いことが報告されている<sup>11)</sup>。

- 2) Cl安定同位体研究によって、地熱流体と海水との関連が認められれば、つぎの段階として、海水から地熱流体への移動速度を、放射性同位体である<sup>36</sup>Clを用いて究明する。<sup>36</sup>Clの半減期は $3.01 \times 10^5$ 年であるから、100万年あるいはそれより長期の現象を取り扱うことが可能だろうからである。

#### 4. おわりに

ここで述べたClの起源に関する問題は、実は、沈み込む海洋プレートの考えとともに、既に登場していた<sup>12)</sup>。また、このプロセスに伴う揮発性物質(H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, Cl)の循環速度の見積りも試みられており、それらの収支に著しいアンバランスのないことが指摘されている<sup>13)</sup>。

島弧の火山においては、最近、水素・酸素安定同位体比の高い安山岩水( $\delta D = -10 \sim -20\%$ ,  $\delta^{18}O = +5 \sim +10\%$ )の起源<sup>14)</sup>、あるいは、火山ガスや地熱ガス中のN<sub>2</sub>の起源についても<sup>15)</sup>、図2と類似のプロセスが提案されている。これらの研究は、プレートの沈み込み-マグマの発生-火山の活動-熱水の流出という一連の過程(海域-陸域間の物質循環)に対する理解の深化に対して、具体的な資料を提供することになるであろう。地球科学におけるホットな課題と言える。

#### 謝 辞

この特別講演の基礎となった、別府地熱系の年代見積りおよびCl収支の再評価は、いずれも大沢信二氏(京都大学理学部地球物理学研究施設)との共同研究である。なお、すでに定着している一般的な考えについては、いちいち文献を挙げていないことをお断りする。

#### 文 献

- 1) 瀬野錦蔵：地球物理，7，131-147，1943
- 2) 山下幸三郎：温泉科学，35，20-33，1984
- 3) Gianelli, G., Yusa, Y., Battaglia, S., Takemura, K.: Mineralogy and Petrology, 45, 247-259, 1992
- 4) 大沢信二，由佐悠紀：温泉科学，46，128，1996
- 5) 由佐悠紀，野田徹郎，北岡豪一：温泉工学会誌，10，94-108，1975
- 6) 大沢信二，由佐悠紀：未発表
- 7) 由佐悠紀：温泉科学，34，92-104，1984
- 8) 由佐悠紀，北岡豪一，神山孝吉，竹村恵二：温泉科学，44，39-44，1994
- 9) Allis, R.G., Yusa, Y.: Geothermics, 18, 743-760, 1989
- 10) 由佐悠紀，大沢信二，北岡豪一，福田洋一：大分県温泉調査研究会報告，47，7-11，1996
- 11) Eastoe, C.J., Guilbert, J.M.: Geochim. Cosmochim. Acta, 56, 4247-4255, 1992
- 12) たとえば，湯原浩三，瀬野錦蔵：温泉学，地人書館，p.293，1969
- 13) 日下部実：科学，60，711-712，1990
- 14) 酒井 均，松久幸敬：安定同位体地球化学，東京大学出版会，p.403，1996
- 15) 大沢信二，由佐悠紀，北岡豪一：温泉科学，45，290-294，1995