

別府「血ノ池地獄」の温泉水及び沈澱物について*

吉田哲雄**・湯原浩三**・中江保男**・野田徹郎***

(昭和52年8月28日受理)

Hot-water and precipitates in the Hot Pool "Chinoike-jigoku", Beppu geothermal area, Kyushu, Japan.

Tetsuo YOSHIDA,** Kozo YUHARA,** Yasuo NAKAE** and Tetsuro NODA***

** Department of Mining, Faculty of Engineering, Kyushu University

*** Research Institute of Balneotherapeutics, Kyushu University

Abstract

The hot pool "Chinoike-jigoku" is located in the northern part of Beppu. It is one of characteristic hot pools in the Beppu geothermal area for the bloody colored hot-water and precipitates. It shows the shape of triangle with a side of about 50m long. The eastern half of the pool is shallow with thick reddish precipitates on the bottom and is several to ten odd cm deep. On the contrary the western half becomes abruptly deeper up to 26m deep. The temperatures of hot-water are in the range 136-60°C from the bottom (26m in depth) to the surface.

The major ions of hot-water measured are Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- and SO_4^{2-} with minor ions of Mn^{2+} , Fe^{3+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} and As, and the pH value is 2.5. The concentration of these ions is almost uniform throughout the pool but the contents of main ions become slightly denser in the eastern shallow part because of evaporation of the water.

Minerals constituting the precipitates are α -cristobarite, tridymite, hematite, kaolin mineral and montmorillonite. Jarosite is found on the surface of the rocks at the margin of the pool. It seems that kaolin mineral and montmorillonite are washed away from the alteration zone by hot-water, and most of silica minerals and hematite are crystalized from the amorphous precipitates on the bottom.

1. はじめに

血ノ池地獄は数多い別府の温泉，地獄等の中でも，その沈澱物の色や湯沼の地形等々から特異なもの1つに数えられる。位置的には別府温泉地域の北縁部丘陵地に集中する噴気及び地獄群（鉄輪温泉）の北方約1.5kmにある。標高は約50mである。

別府温泉地域は温泉の研究だけでなく火山地質学的にも興味ある地域として，古くから松本(1918)，鈴木(1937)，笠間(1953)らによって研究がなされて来た所である。ここで簡単に別府温泉地域の地質環境について記しておく。本地域は第三紀中新世から第四紀更新世に至る火山活動により形成された火山体により，東側を除く3方を囲まれた地域で，その中に温泉及び噴気群

* 第30回日本温泉科学会にて講演

** 九州大学工学部資源工学科

*** 九州大学温泉治療学研究所

が発達している。本地域中、由布、鶴見の両岳は最も新しい火山で、山頂には火口を有し、また数個の寄生火山を持つ活火山である。別府温泉の多くは鶴見岳山麓に広がる扇状地に湧出するが、その他噴気及び硫気活動はそれより標高の高い所に認められ、特に地獄は北部の丘陵地に集中し、そこに鉄輪の温泉及び地獄群、その北に血ノ池、竜巻の両地獄が存在する。これらの噴気、温泉、地獄等は本地域の地質構造を規制する割れ目系（断層系）により支配されていると考えられる（松本他、1967）。

また「血ノ池地獄」については第1表に示すような爆発の記録（中村清典氏私信）があり、最近

**第1表 血ノ池地獄
爆発記録**

明治	8年	
	13年	7月
	21年	8月
	27年	9月
	38年	5月
	41年	2月
大正	元年	9月
	元年	12月
昭和	2年	9月2日

近のものでは昭和2年9月2日の爆発記録（別府市観光協会編、1963）がある。以上のことや湯沼あるいはその周辺の地形等から血ノ池地獄は、構造線上にのる一種の小爆裂火口あるいは爆裂火口底の一部とも考えられる。

ここではこれらの地質環境等も考慮に入れて、「血ノ池地獄」の温泉水の化学成分、沈澱物を構成する鉱物等を記し、更にこれらの生成環境について検討する。

2. 高温湯沼の地形及び水温分布

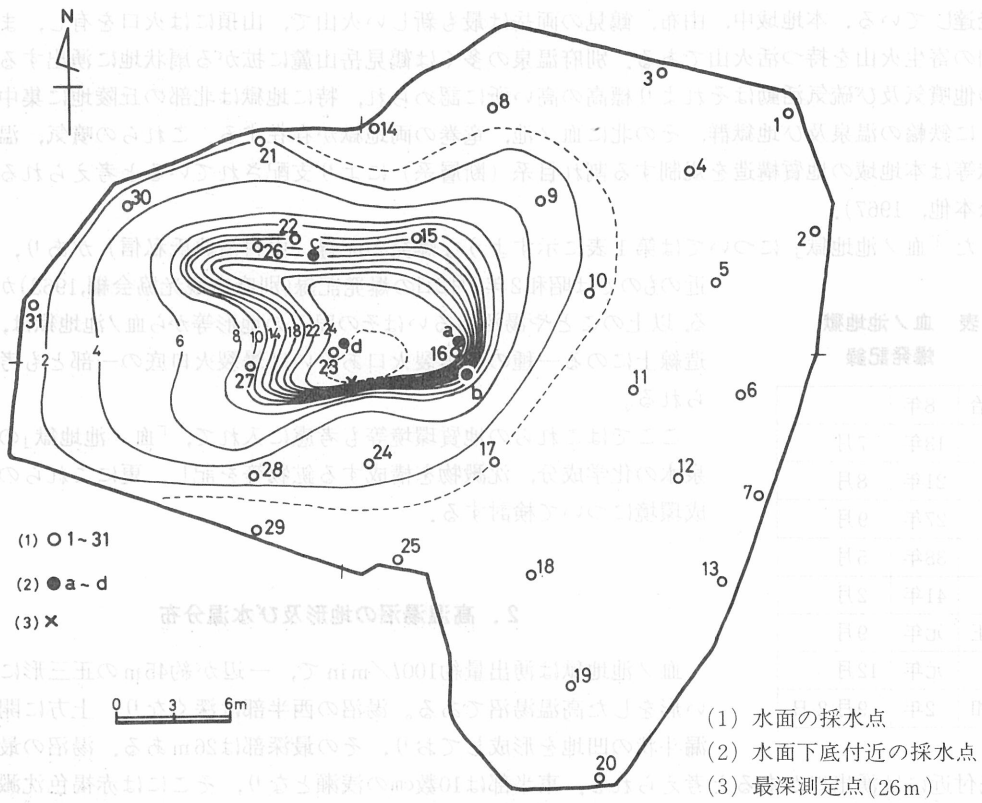
血ノ池地獄は湧出量約100l/minで、一辺が約45mの正三角形に近い形をした高温湯沼である。湯沼の西半部は深くなり、上方に開く漏斗状の凹地を形成しており、その最深部は26mある。湯沼の最深部底付近には湧出口があると考えられる。東半部は10数cmの浅瀬となり、そこには赤褐色沈澱物が堆積している（第1図）。

水温は最深部付近（25.7m）で136.8℃を示す他、底付近で100℃以上の高温層が認められる。しかしそれより浅くなると急に水温が下り80℃程度になり、それから水面まで温度変化は少なく均一に近い。水面では西半部凹地部の中心付近で最高81℃を示し、それから周辺に向かって温度は低下し75℃程度になる。東側の浅瀬では75℃から約60℃まで湯沼の縁に向かって水温の低下が認められる。

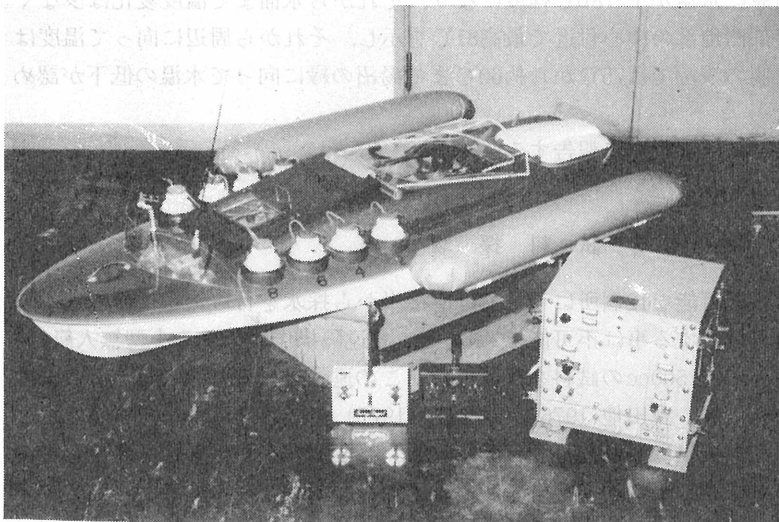
以上の詳細については本誌に稿を改めて報告する。

3. 試料採取

温泉水の採取は、岸から採取可能な12個所については直接岸から採水を行ったが、岸の近く以外は高温の為危険が伴い直接採水する事は不可能である。そこで遠隔操作のできる小型無人艇（第2図）を用い19個所から各々300～500ccの試料を採取した。この遠隔操作小型無人艇とその採水及び水温測定等の装置については、吉田他（1976）、湯原他（1977）に詳しい報告があるので、ここでは概略について述べる。無人艇は8個のポリ容器（500cc）と8個の小型ポンプを装備しており、ポンプに付けたマイクロスイッチの切換えを岸からの遠隔操作で行い採水する。移動も本来は遠隔操作で行うが、今回は湯沼が狭く浅瀬が多い為、無人艇の前・後部に綱を付け岸から引いて移動させた。また本艇に装備されている水温測定用のテレメータ装置を用い、水温を測った。湯沼底付近の試料採取には、京都大学理学部地球物理学研究施設より借りた採水装置を使って4試料を得た。これは円筒形の採水装置で、その上部にある弁を開いた状態で底まで沈め、次に弁を閉じる為の錘を落とし、ふたをした状態で引き上げる。引き上げる途中の水は入らない。しかし操作



第1図 血ノ池地獄の地形及び採水点



全長190cm, 全幅67cm
 全備重量32kg (採水後
 + 4 kg), 写真手前右
 より测温テレメータ受
 信機, 採水ポンプ操
 作用送信機, 操船用送信
 機

第2図 遠隔操作無人艇

が難しく採水したのは4点だけである。以上計35試料の採水位置を第1図に示す。

4. 温泉水の化学成分

採水された温泉水試料のすべて(35個)についてpH, 主要陽イオン Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 、主要陰イオン Cl^- , SO_4^{2-} の分析を行い温泉水の基本的な化学的特徴を知り, これらの成分が湯沼内でどのような濃度分布を示すかを検討した。また酸性温泉には重金属成分が多く含まれるが, 中でも含有量の大きい Fe^{3+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} を分析し, 更に一部試料(11個)については食塩型熱水に特徴的な成分であるAsの分析も行い, 同じく濃度分布や沈澱物との関係を調べた。

分析は陽イオン及び重金属については原子吸光法, 陰イオンについては, Cl^- はモール法, SO_4^{2-} は比濁法, AsについてはAg DDTcを用いた吸光光度法に頼った。pHは実験室に持ち帰った後, ガラス電極法で測定したものである。

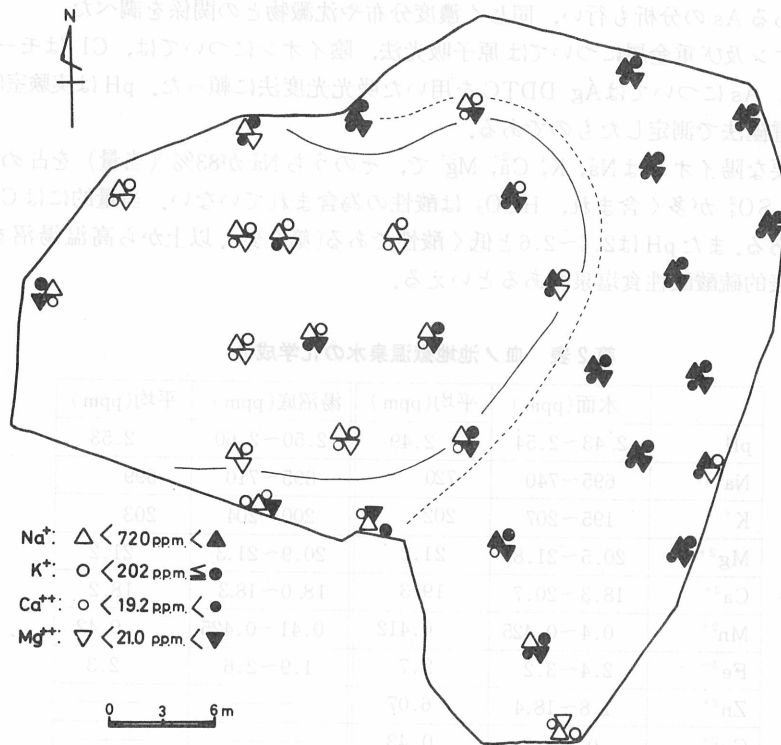
温泉水の主要な陽イオンは Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} で, そのうち Na^+ が83% (当量)を占めている。陰イオンは Cl^- と SO_4^{2-} が多く含まれ, HCO_3^- は酸性の為含まれていない。当量的には Cl^- が SO_4^{2-} の2倍程度である。またpHは2.4~2.6と低く酸性である(第2表)。以上から高温湯沼を形成する温泉水は, 代表的硫酸酸性食塩泉であるといえる。

第2表 血ノ池地獄温泉水の化学成分

	水面(ppm)	平均(ppm)	湯沼底(ppm)	平均(ppm)
pH	2.43~2.54	2.49	2.50~2.60	2.53
Na^+	695~740	720	695~710	699
K^+	195~207	202	200~204	203
Mg^{2+}	20.5~21.8	21.2	20.9~21.3	21.2
Ca^{2+}	18.3~20.7	19.3	18.0~18.3	18.2
Mn^{2+}	0.4~0.425	0.412	0.41~0.425	0.42
Fe^{3+}	2.4~3.2	2.7	1.9~2.6	2.3
Zn^{2+}	1.8~18.4	6.07	—	—
Cu^{2+}	0~4.8	0.43	—	—
Pb^{2+}	0	0	—	—
As	0.86~1.24	1.00	0.61~0.90	0.78
Cl^-	982~1030	1004	839~991	946
SO_4^{2-}	549~643	604	533~634	600

分析を行った重金属成分 Mn^{2+} , Fe^{3+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} は, 一部試料の Zn^{2+} を除いて数ppmあるいはそれ以下であった。また Pb^{2+} は検出されない。しかしこれらの値は, 中性の一般温泉に比べるとかなり大きく, 酸性熱水による壁岩中の重金属成分の溶出が盛んである事を示している。Asは1ppm程度含まれている。Asは一般に食塩型熱水にはppmオーダーで含まれており, その含量は熱水が深部で高温であるほど多く, Cl^- との相関がみられる。その意味では, 「血ノ池地獄」温泉水中のAsは九重大岳, 八丁原等の深部熱水に近い値であり(野田・古賀, 1973), 因みに陽イオンの相互比から算出される化学平衡温度も27.9°Cと高温である(Fournier and Truesdell, 1973)。試料水のうちNO. 1の蒸発残留物については, 蛍光X線分析を行い, 更にBr, Sr, Rbが検出された。食塩熱水型温泉は, 普通の温泉に比べると含有塩類量が多く, その上酸性であることが重金属成分の溶け込みを促し, このように多種の成分を有する結果となっている。

主成分については試料間、ひいては湧出過程での濃度変化の幅は大きくない。ただ、沈澱物の堆積する東側浅瀬部と凹地のある西側とでは主要成分について僅かに濃度に差が認められる。第3図は陽イオンについて、第4図は陰イオンについて濃度差を示したものである。これらの図には各々のイオンについて便宜的な境界値(Na^+ : 720ppm, K^+ : 202ppm, Ca^{2+} : 19.2ppm, Mg^{2+} : 21.0ppm, Cl^- : 1.000ppm, SO_4^{2-} : 600ppm)を取り、その値より大きいものと小さいものに分けて表わし



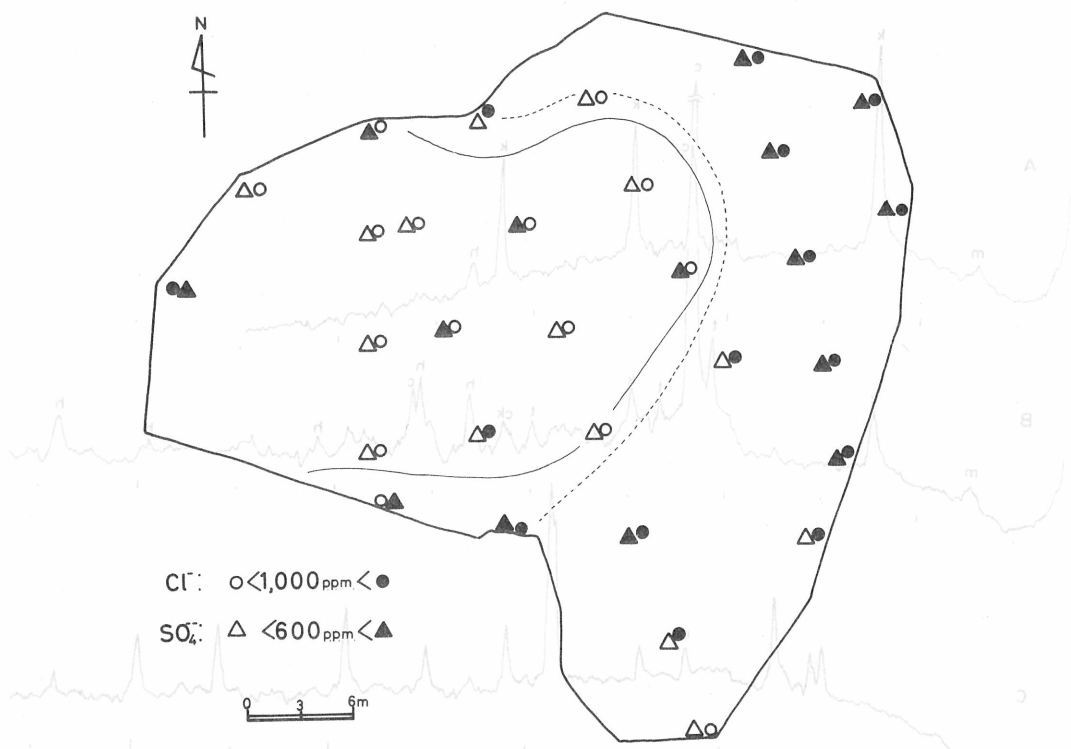
第3図 湯沼の東側と西側の陽イオンの濃淡

たものである。これらから見て明らかなように、陽イオン、陰イオンのいずれについても東側浅瀬の部分、西側凹地部より1割程度濃度が高いという結果が出た。この境界線は湯沼が急に深くなる地形とよく一致している。この事から浅瀬部では温泉水の蒸発による化学成分の濃縮があると考えられる。この事は蒸発量の測定結果からも支持される。湯沼の南端Na20では濃度が低くなっているが、これは地表水の流れ込みによる稀釈によるものである。このように主要成分濃度の変化は、主に濃縮や稀釈の結果であり反応による増減の効果は非常に小さい。即ち、これらの4種の陽イオンと2種の陰イオンは同じ傾向で濃度変化をしていると言える。

5. 沈 澱 物

沈澱物は湯沼の東側半部に堆積し浅瀬を形成している。その呈する色より「血ノ池地獄」の名がある。また湯沼より採取された温泉水は放置すると透明になり、沈澱物が容器の底にたまる。

実験に用いた試料は浅瀬にたまっている沈澱物と、採水後容器の底にたまった沈澱物、更に岸の岩石表面に沈着し固結した赤色付着物の3種である。これらのうち浅瀬にたまった沈澱物につ



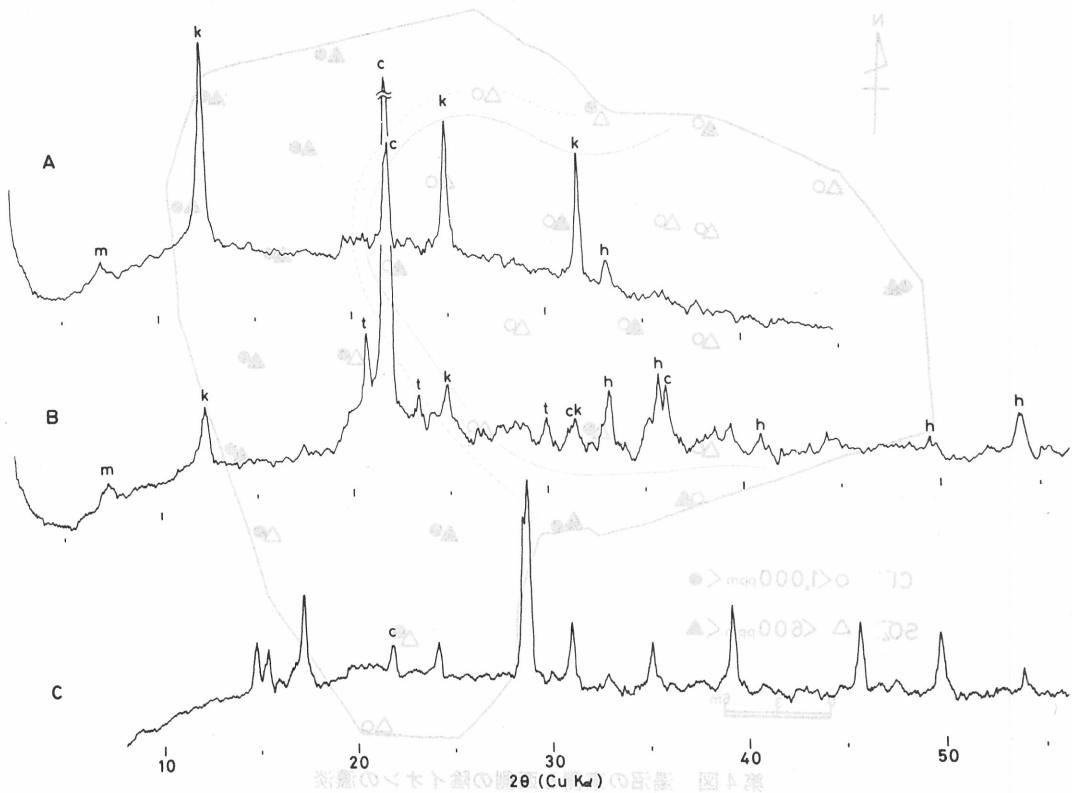
第4図 湯沼の東側と西側の陰イオンの濃淡

いては蛍光X線分析により微量成分を調べ、そのうちのAs, Zn, Pb, Cuについては沈澱物を硝酸(1+1)で溶かし、Asはモリブデンブルー吸光度法、Zn, Pb, Cuは原子吸光法により定量分析を行った。更に鉱物については、3種とも各々X線回折により調べられた。カオリン鉱物については加熱処理(650℃, 2時間)後7Åの回折線が消えるのを確認した。更に一部示差熱分析も併用した。モンモリロン石は、エチレングリコール処理により、12Åの底面反射が17Åに増加する事で確認した。

今回調べた浅瀬にたまった沈澱物から検出できた微量成分は、As, Zn, Pb, Cu, Sr, Zr, Baである。そのうちAsは4440ppmと含有量が多く、Pbは442.5ppm, Znは104.1ppm, Cuは56.6ppmと重金属も多く沈澱物中に濃縮しているのがわかる。特にPbについては、水面付近の温泉水中に含まれない事から、そのほとんどがPbSO₄の形で沈澱物中に入り、温泉水中からは取り除かれていると考えられる。その他のSr, Zr, Baは数~数10ppm程度含まれている。主成分については、岩崎他(1954)や古賀(1972)により調べられており、その50%以上はSiO₂でAl₂O₃が20%弱、Fe₃O₂が10%前後、CaO, Na₂O, K₂Oが数%で、強熱減量を合せて99%以上になる。

沈澱物中に認められる鉱物は既に知られているα-クリストバル石、赤鉄鉱、カオリン鉱物の他にトリジマイト、モンモリロン石があり、X線回折では確認出来なかったが磁鉄鉱と思われる強磁性鉱物が少量認められる。更に岸の岩石表面に付着しているジャロサイトKFe₃(SO₄)₂(OH)₆が認められる。

水面及び湯沼底から採取した温泉水試料の容器の底にたまった沈澱物には、カオリン鉱物とα-クリストバル石、僅かにモンモリロン石と赤鉄鉱が認められる(第5図A)。浅瀬にたまった沈澱物では多量のα-クリストバル石が生成しており、それにカオリン鉱物、赤鉄鉱、トリジマイト、



第5図 沈澱物のX線回折図

A: 採水容器の底にたまった沈澱物, B: 浅瀬にたまった沈澱物, C: 岸の岩石表面の付着物. k: カオリン鉱物, m: モンモリロン石, c: α -ークリスタル石, t: トリジマイト, h: 赤鉄鉱, Cはcを除いてすべてジャロサイトの回折線. Aのみ定方位試料, B・Cは不定方位試料, ゴニオメータの速度はAのみ $1^\circ/\text{分}$, 他は $2^\circ/\text{分}$, その他の測定条件は同じ.

更に少量のモンモリロン石が認められる(第5図B)また磁鉄鉱と思われる強磁性鉱物も入る. 岸の岩石表面の付着物は前述の2種類の沈澱物と同様に赤色を呈し, 硬く岩石表面に殻を成して生成している. これはジャロサイトと少量の α -ークリスタル石から成る(第5図C). (第3表). 「血ノ池地獄」に産するジャロサイトは生成温度が低い(80°C 以下)ことから, K^+ の位置を H_3O^+ が置換した水酸化鉄ジャロサイトあるいは一部置換したこれらの固溶体が生成しているかもしれない(Brophy and Sheridan, 1965, Dutrizac and Kaiman 1976). 以上の鉱物は量が少なく判定しにくいモンモリロン石を除いて, X線回折図から判断する限りでは, いずれも結晶度はかなり高いと考えられる.

6. まとめと考察

別府血ノ池地獄は特異な形状, 沈澱物を有する高温湯沼である. 温泉水及び沈澱物については以下のようにまとめる事ができる.

第2表 血ノ池地獄温泉水の化学成分

	採水容器底の沈澱物 (A)	湯沼の沈澱物 (B)	岸の岩石表面の付着物 (C)
カオリン 鉱物	○	○	
モンモリロン石	●	●	
α-クリストバル石	○	◎	○
トリジマイト		○	
赤鉄 鉱物	●	○	
磁鉄 鉱物		●(?)	
ジャロサイト			◎
微量成分		As : 4440ppm Pb : 442.5 Zn : 104.1 Cu : 56.6 Sr } Zr } 数ppm Ba }	

(注) ◎多量, ○中量, ○少量, ●微量

1) 温泉水はおよそpH2.5の代表的な硫酸酸性食塩泉である。全般にpH, 主要な化学成分には変化が少なく均一に近いが, 主成分のNa⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻については東側浅瀬部が西側凹地部より濃度がやや高い。濃度差は僅かで, 東側浅瀬部の水の蒸発による濃縮で説明される。As及び重金属イオンについては一般の温泉に比べて濃度が高く, 特に沈澱物中にはAsが4440ppmと多量検出され, Pb, Zn, Cuも数100~数10ppmと重金属及びAsの濃縮が認められる。

2) 水面及び湯沼底から採水された試料からの沈澱物は非晶質物が主体で, それにカオリン 鉱物, α-クリストバル石があり, 更に少量のモンモリロン石, 赤鉄鉱が混じる。それが浅瀬にたまった沈澱物になると非晶質物の量は減少し, 代りに多量のα-クリストバル石が生成しトリジマイト, 赤鉄鉱も顕著に現われる。それに対し相対的にカオリン 鉱物, モンモリロン石の量は減少する。これは温泉水から非晶質のシリカや鉄化合物が水底に沈澱し, 更にそこで結晶化が進んだ事によるものと考えられる。また粘土 鉱物については, 既に温泉水試料中に結晶度の良好なものとして相当量混っている事, 更に浅瀬に沈澱した後, シリカ 鉱物や赤鉄鉱のように量が増加したり, 結晶化が進むといった傾向がない事から考えて, はじめから温泉水中に微細な結晶として存在していたものと考えられる。特にモンモリロン石については, pHから考えて安定な生成環境ではない事から, 血ノ池地獄から直接沈澱生成したとは考えにくい。よってこれらは温泉水が地下を流動して来る際に, 粘土化した壁岩から取り込まれたもので, この様に軽くて微細な粘土 鉱物は温泉水により運ばれ, 自然湧出していると考えられる。α-クリストバル石の一部も, 同様な過程を経たものもあると考えられる。岸の岩石表面に皮殻状に形成されたジャロサイトは大気や地表水の影響を受ける環境下で, 温泉水に含まれるFe³⁺あるいは非晶質鉄質沈澱物とSO₄²⁻が化合し, 結晶化したものと考えられる。

以上まとめると, 血ノ池地獄に産する 鉱物には次の3つの異った環境で生成したと考えられる 鉱物が認められる。それは(i)温泉水により微細な結晶の状態 で運ばれて来た粘土 鉱物のカオリン 鉱物とモンモリロン石, (ii)温泉水から生成する非晶質沈澱物が水面下に堆積し, その後結晶

化が進んだ α -クリストバル石, トリジマイト, 赤鉄鉱, (iii) 大気や地表水の影響下で生成した硫酸塩鉱物のジャロサイトである。

謝 辞

本調査研究を行うに当たり、快く場所を提供しご協力下さった血ノ池地獄支配人中村清典氏に、また採水器を貸して下さった京都大学地球物理研究施設山下幸三郎助教授、終始ご助言、ご討議下さった本学井沢英二講師に深く感謝の意を表します。調査には防衛大学校関岡満教授、京都大学地球物理研究施設北岡豪一氏及び本学中尾晴次氏、本学工学部学生大島勝文・井上修一・柴戸隆秀・桜木俊一・藤本政晴諸氏のご協力を仰いだ。併せて感謝致します。

文 献

- 1) 別府観光協会編：別府温泉史，いずみ書房（1963）。
- 2) Brophy, G. P. and Sheridan, M. F. : Sulfate Studies IV : The jarosite-natrojarosite hydronium jarosite solid solution series. *Am. Mineral*, **50**, 1595~1607 (1965).
- 3) Dutrizac, J. E. and Kaiman, S. : Synthesis and properties of jarosite-type compounds. *Can. Mineral*, **14**, 151~158 (1976) .
- 4) Fournier, R. O. and Truesdell, A. H. : An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **37**, 1255~1275 (1973).
- 5) 岩崎岩次・福富博・樽谷俊和：温泉沈澱物の地球化学的研究（第2報）鉄質沈澱物について（その1）。*日化*, **75**, 282~286 (1954).
- 6) 笠間太郎：速見火山区の地質，*地質雑*, **59**, 161~172 (1953).
- 7) 古賀昭人：別府血ノ池地獄について，大分県温泉調査研究報告，23号，72~74 (1972).
- 8) 松本唯一：由布・鶴見火山群，*地質雑*, **25**, 487~505 (1918).
- 9) 松本達郎・野田光雄・宮久三千年：日本地方地質誌九州地方，191~194 朝倉書店（1967）
- 10) 野田徹郎・古賀昭人：九重・大岳八丁原地区深部熱水の微量成分，大分県温泉調査研究報告，24号，64~73 (1973).
- 11) 鈴木政造：別府付近の地史と温泉脈，*地球物理*, **1**, (1937).
- 12) 山下幸三郎・吉川恭三：別府血ノ池地獄について，第26回日本陸水学会講演要旨集（1961）。
- 13) 吉田哲雄・末倉康雄：RCボートによる海底火山の水温測定，*モデルジャーナル*, **1**, (4) 113~116 (1976).
- 14) 湯原浩三・関岡満・吉田哲雄：リモート・コントロールする無人ボートによる海面温度測定，*水温の研究*, **20**, (5), 15~24 (1977).