

昭和57年 3 月

原 木 著

別府血の池地獄の水深・水温・水質・ 沈澱物・放熱量及び放出水量の変化

*九州大学工学部資源工学科, **地質調査所地殻熱部

湯原浩三*・江原幸雄*・野田徹郎**・中尾晴次*

(56年 8 月12日受付, 56年11月15日受理)

Changes in Depth, Temperature, Chemical Composition, Precipitate, Heat Discharge and Water Discharge of the Hot Pool "Chinoike-jigoku" Beppu, Kyushu, Japan

Kozo YUHARA*, Sachio EHARA*, Tetsuro NODA** and Seiji NAKAO*

* Department of Mining, Faculty of Engineering, Kyushu University

** Geothermal Research Department, Geological Survey of Japan

Abstract

The hot pool "Chinoike-jigoku" is located in the northern part of Beppu, Kyushu, Japan. It has a shape of nearly regular triangle with the side of about 50m. The eastern part is very shallow since red sediments are deposited, while the western part is generally deep and the deepest part is about 30m.

Red sediments in the bottom of the hot pool were disturbed and the surface temperature decreased rapidly with relation to the earthquake occurred off the eastern coast of Kyushu in December 12, 1980. We measured water depth, water temperature, heat discharge and water discharge in January 23 & 24, 1981. Chemical compositions of hot water and red sediment were also analysed in the laboratory. As a result, it was clarified that water temperature, heat discharge and water discharge decreased together, although the change in depth was not clear and the maximum temperature (about 136°C) of the thermal water issuing from the bottom of the hot pool didn't change. The contents of the major ions per unit volume of hot water decreased generally but minerals constituting the red sediments did not change. We deduced that such decrease originated in the decrease of the water and heat supply from the bottom of the hot pool, from the standpoint of water and heat balance in it. Perhaps seismic vibration and/or disturbed sediments must have contracted the channel or outlet of the issuing thermal water.

I. はじめに

別府血の池地獄は別府温泉地域の北部にあり、1辺約50mの正三角形に近い形をしている高温湯沼である。そして、高温水から沈澱する赤色沈澱物の存在によって特徴づけられ、その名前の

由来となっている。成因的には小爆裂火口内に形成された高温湯沼とすることができる。また、別府温泉内に存在する他の多くの噴気・温泉と同様に、この地域に推定されている構造線に沿って存在していると言える。

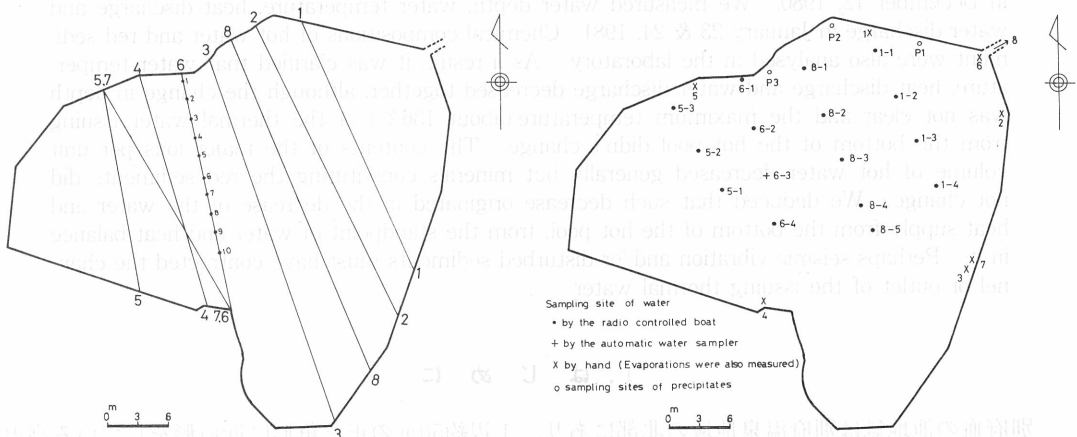
近年の活動としては、1875年（明治8年）以来、数年～10数年の間隔で9回の爆発があったと言われている（吉田他，1978）が1927年（昭和2年）以降は知られていない。

1980年12月12日宮崎県延岡市の南東40kmの日向灘にマグニチュード6.4の地震があり、大分市では震度IVであった。この地震で高温湯沼底が攪拌され、高温湯沼内全層が赤色沈澱物で濁った（通常、高温水自体は若干の浮遊物を含むがほとんど無色透明で湯沼底の沈澱物が赤褐色を呈している）。このような現象はこれまでも地震時にも見られたが短時日で元の状態に復したと言われている。しかしながら、今回の地震の後は高温水内の状態は中々元には復さず、更に湧出水の温度・量の低下する傾向が見られた（中村清典氏私信）。このようなことから、高温湯沼内部でどのような状態変化が発生したかどうかを明らかにするため、各種の測定を行うことにした。筆者等は今回の異常状態が発生する以前の1975年8月19・20日、高温湯沼の水深・水温・水質及び放熱量などに関して詳細な調査を行ない、すでに報告した（湯原他，1978，吉田他，1978）。今回の調査では前回との変化を見出すことに主眼を置き、測定方法などに若干の改良を加えた点はあるがほぼ前回と同じ方法で実施した。従って、測定方法等に関しては前掲の報告を参照されたい。今回の測定は1981年1月23日及び24日に行なわれた。

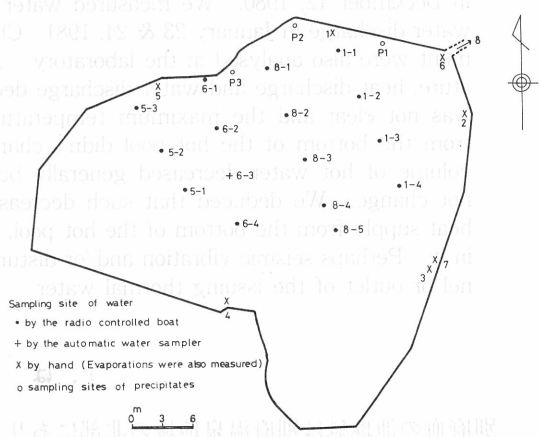
II. 各量の変化

測線及び採水地点

水深・水温の測定のための測線を第1図に示す。測線上では3m間隔、垂直方向には1m間隔で湯沼底まで測定した。採水地点を第2図に示す。図中●印はリモコンボートによる表面水採水点である。+印（湯沼内最深地点）では今回新たに製作した簡易自動採水器（奥西他，1976）によって、5m間隔で深度別の採水が行なわれた。×印では採水とともに蒸発量の測定を行なった。○印では沈澱物を採取した。以下では1975年8月19・20日の測定を前回の測定、1981年1月23・24日の測定を今回の測定と記すことにする。



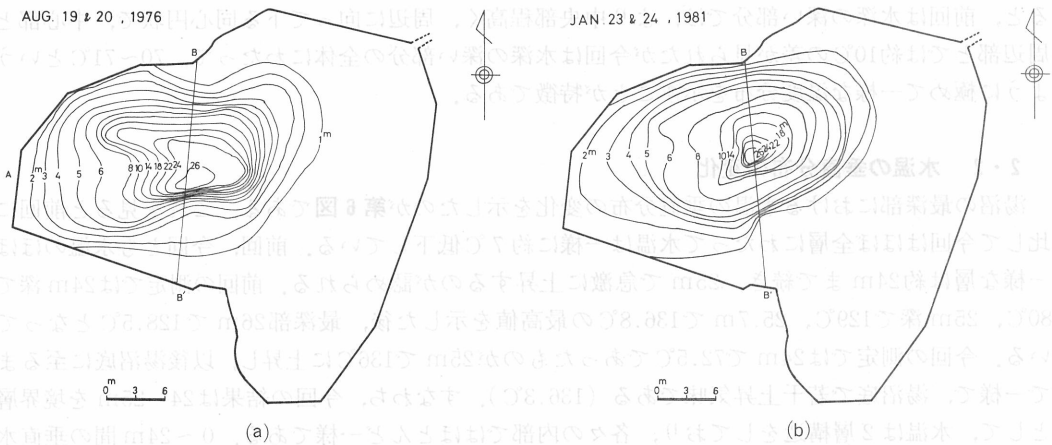
第1図 水深及び水温測線



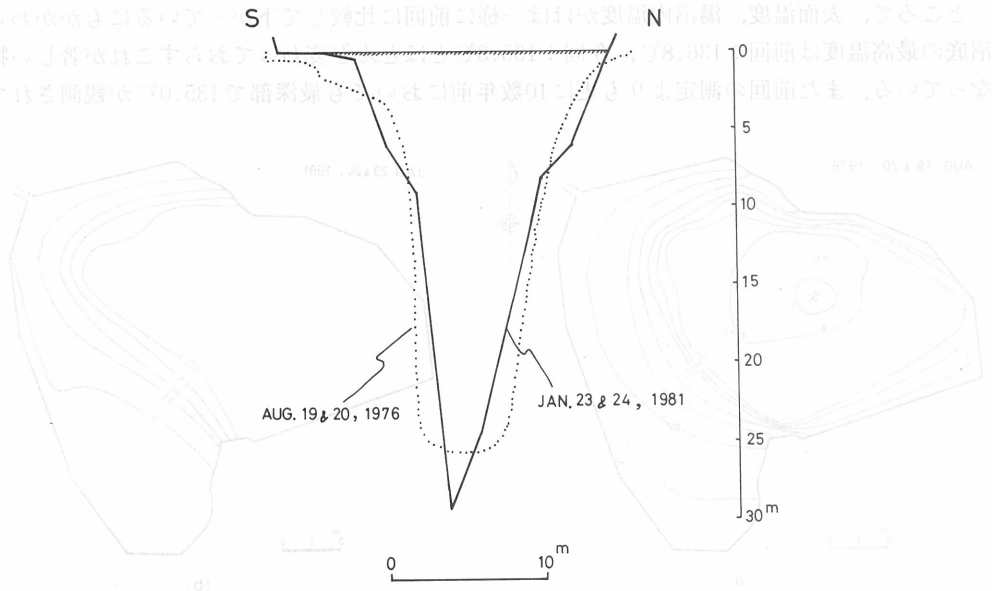
第2図 採水点位置

1. 水深の変化

第3図(a), (b)にそれぞれ前回及び今回得られた水深図を示す。湯沼底の形状には若干の変化が見られるが、ほぼ湯沼の中央部における漏斗状の急な凹地は依然として存在している。最深点が前回に比べ今回はやや北側に寄っており、かつ深くなっている(26m→29.3m)がこの部分の湯沼底は急激に深くなっており、測点の位置の決定にはある程度の誤差は避けられないので見掛け上のものである可能性も否定できない。たとえば前回の測定より更に10数年前、最深部は32mと報告されている(山下・吉川, 1961)。第3図(a)及び(b)の全体的傾向を比較すると前回に比べ今回は漏斗状の部分の浅い部分が広がり、深い部分は逆に狭くなっているように見える。このことをB-B'線について示したのが第4図である。これを見ると上述した傾向がよく読み取れる。これは湯沼底の堆積物が地震時の震動に伴って移動した可能性を示している。地震後、湯沼内で



第3図 湯沼底の等深線 (a)1976年8月19・20日 (b)1981年1月23・24日



第4図 B-B'線に沿う湯沼底地形断面図

は長期間、乱された赤色沈澱物で濁ったがこのことと関連しているのかも知れない。

2. 水温の変化

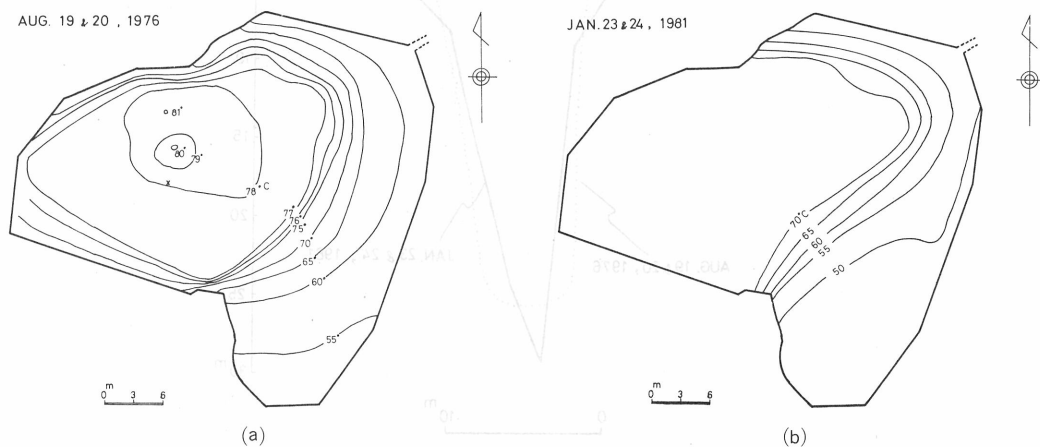
2.1 表面水温の変化

第5図(a), (b)にそれぞれ前回及び今回の表面水温分布を示す。湯沼の水深が深い部分（西側の凹地部）では高温で、水深が浅い部分（東側の浅瀬の部分）では岸に向かって急激に温度が低下するというパターンは前回、今回とも同じである。しかしながら、表面水温は全体的に、前回に比べ今回は一様に約7℃低くなっている。季節変化を考慮する必要があるが（前回の測定は夏であり、今回は冬である）後に示すように、深部でもこのような変化が起っていることから、約7℃の低下というものは湯沼内部の原因による低下と考えられる。表面水温パターンを更に詳しく見ると、前は水深の深い部分では、より中央部程高く、周辺に向かって下る同心円状で、中心部と周辺部とでは約10℃の差が見られたが今回は水深の深い部分の全体にわたって、70~71℃というように極めて一様な温度分布を示すことが特徴である。

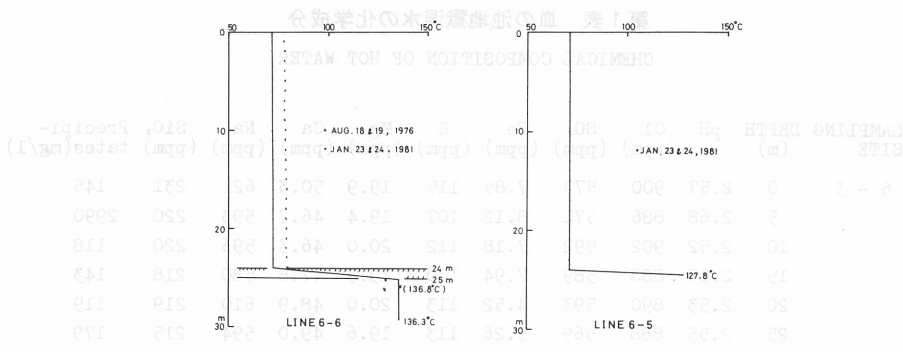
2.2 水温の垂直分布の変化

湯沼の最深部における水温の垂直分布の変化を示したのが第6図である。これを見ると前回に比して今回はほぼ全層にわたって水温は一様に約7℃低下している。前回、今回とも水温のほぼ一様な層は約24mまで続き、25mで急激に上昇するのが認められる。前回の測定では24m深で80℃、25m深で129℃、25.7mで136.8℃の最高値を示した後、最深部26mで128.5℃となっている。今回の測定では24mで72.5℃であったものが25mで136℃に上昇し、以後湯沼底に至るまで一様で、湯沼底で若干上昇気味である（136.3℃）。すなわち、今回の結果は24~25mを境界層として、水温は2層構造をしており、各々の内部ではほとんど一様である。0~24m間の垂直水温勾配を調べてみると、前回は約0.09℃/mで今回は0.03℃/mと1/3になっており、水温の一様性が増している。

ところで、表面温度、湯沼内温度がほぼ一様に前回に比較して下がっているにもかかわらず湯沼底の最高温度は前回：136.8℃、今回：136.3℃とほとんど変わっておらずこれが著しい特徴となっている。また前回の測定よりも更に10数年前においても最深部で135.0℃が観測されている



第5図 表面水温分布 (a)1976年8月19・20日 (b)1981年1月23・24日

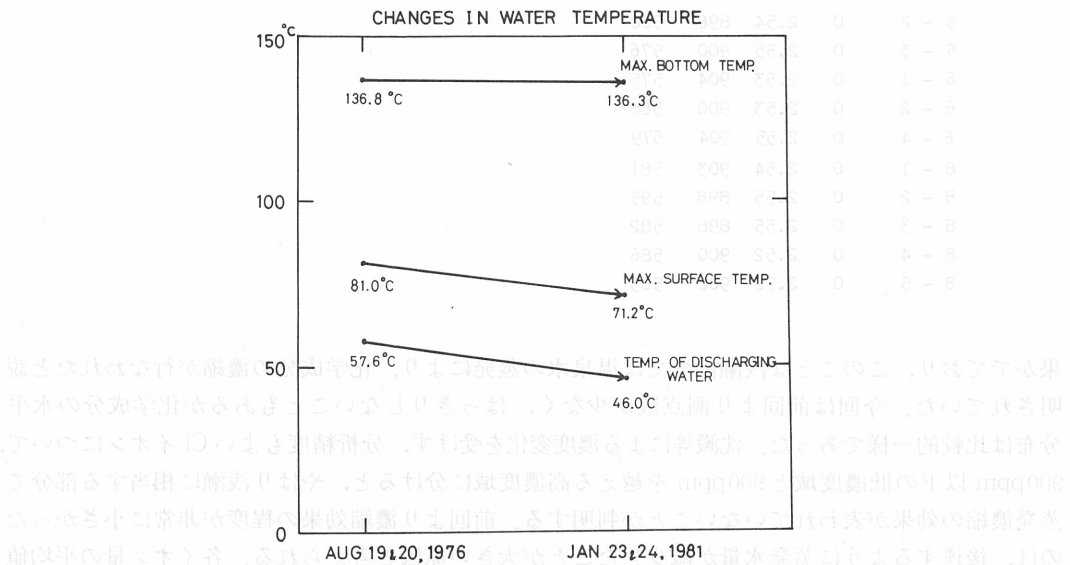


第6図 測線6の5及び6における垂直水温分布

(山下・吉川, 1961). なお, 前回, 今回を通して, 湯沼底とその直上1mの温度とを比較してみると, 最深点の高温部を除き, いずれも両者は等しいか湯沼底の方がわずかに低い. このことは湯沼底からの熱の供給は最深点付近に限られていることを示している.

2・3 代表的水温の変化

湯沼内の代表的水温変化を第7図にまとめて示した. 湯沼底最高温度はほとんど変化していないが湯沼表面温度最高値及び湯沼末端からの流出水温度はほぼ同程度下がっている.



第7図 水温の変化

3. 水質の変化

水質の化学分析結果を第1表に示す.

3・1 表面水質の変化

前回の結果では陽イオン, 陰イオンともに東側浅瀬の部分が西側凹地部分より1割程度高い結

第1表 血の池地獄温泉の化学成分

CHEMICAL COMPOSITION OF HOT WATER

SAMPLING SITE	DEPTH (m)	pH	Cl (ppm)	SO ₄ (ppm)	Fe (ppm)	K (ppm)	Mg (ppm)	Ca (ppm)	Na (ppm)	SiO ₂ (ppm)	Precipitates(mg/l)
6-3	0	2.57	900	573	7.85	115	19.9	50.3	621	231	145
	5	2.68	886	571	8.12	107	19.4	46.7	593	220	2990
	10	2.52	902	592	7.18	112	20.0	46.3	596	220	118
	15	2.55	888	589	7.94	110	19.9	47.8	580	218	143
	20	2.53	890	593	4.52	113	20.0	48.9	610	219	119
	25	2.55	888	569	5.26	113	19.6	49.0	594	215	179
	29	2.56	940	578	5.50	114	203	49.4	611	221	566
6	0	2.53	903	589		114	19.7	48.9	604	219	123
7	0	2.52	922	598		116	20.2	47.6	615	225	17
8	0	2.53	897	597		112	19.9	48.9	583	222	18
1	0	2.54	900	563							
2	0	2.53	918	600							
3	0	2.52	922	586							
4	0	2.53	905	577							
5	0	2.53	905	547							
1-1	0	2.58	899	574							
1-2	0	2.56	907	536							
1-3	0	2.55	903	566							
1-4	0	2.56	907	582							
5-1	0	2.53	899	570							
5-2	0	2.54	896	580							
5-3	0	2.55	900	576							
6-1	0	2.53	904	575							
6-2	0	2.53	900	568							
6-4	0	2.55	904	579							
8-1	0	2.54	903	581							
8-2	0	2.55	898	595							
8-3	0	2.55	898	582							
8-4	0	2.52	900	586							
8-5	0	2.52	902	563							

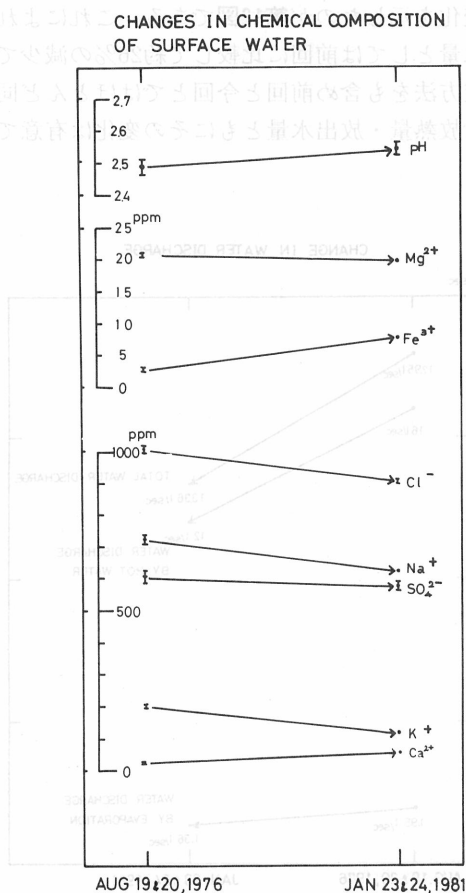
果がでており、このことは浅瀬部分では温泉水の蒸発により、化学成分の濃縮が行なわれたと説明されていた。今回は前回より測点数が少なく、はっきりしないこともあるが化学成分の水平分布は比較的一様であった。沈澱等による濃度変化を受けず、分析精度もよいClイオンについて、900ppm以下の低濃度域と900ppmを越える高濃度域に分けると、やはり浅瀬に相当する部分で蒸発濃縮の効果が表われていないことが判明する。前回より濃縮効果の程度が非常に小さかったのは、後述するように蒸発水量が減少したことが大きい原因と考えられる。各イオン量の平均値の変化を示したのが第8図である。図中黒丸と縦棒で示したものはすべての分析値の平均値と標準偏差を示し、黒丸で示したものは1個の分析値である。前回と今回を比較してみると、pHは若干上昇した(2.49±0.02→2.54±0.02)。またCa²⁺、Fe³⁺のイオンが増加した以外はすべて減少した。変化率としてはいずれも数~10%程度の減少である。この減少はpHの上昇と合わせ考えると、総放出水量に占める高濃度酸性の原熱水量の割合が減少したことに対応するものと言てよい。

3・2 湯沼底の水質変化

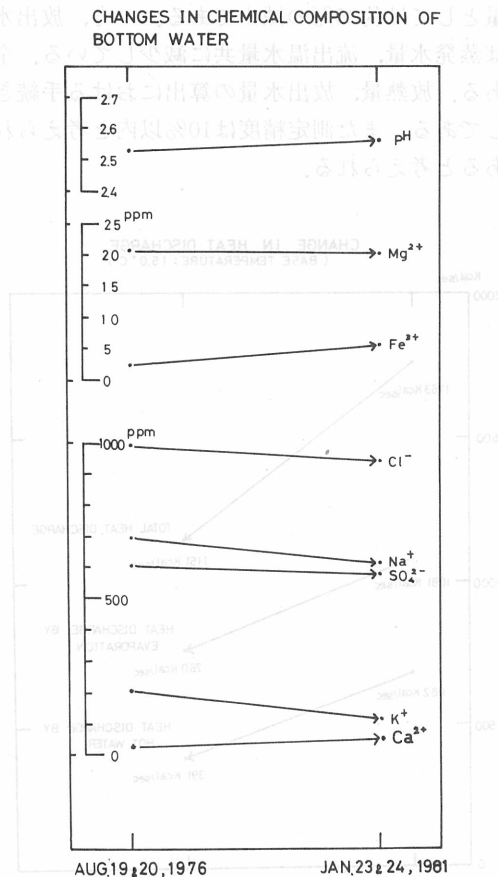
湯沼底の水質変化を第9図に示す。これを見るとその変化の様子(変化の方向及び量)は表面水質の変化とほとんど全く同じと言ってよい。このことはまた水質が垂直方向にほとんど一様であることに対応している。今回の測定における最深部での水質の垂直分布を第10図に示した。pHが5m深で異常に大きい値を示す他は各イオンとも垂直方向にほぼ一様な分布を示しているが、 Fe^{3+} だけが15~20mを境に2層構造をしているのが注目される(上層で 7.77 ± 0.41 ppm, 下層で 5.09 ± 0.51 ppm)。また、 Cl^- が最深部の試料のみ、他より5%程濃度が高いことも注目される。

4. 沈澱物の変化

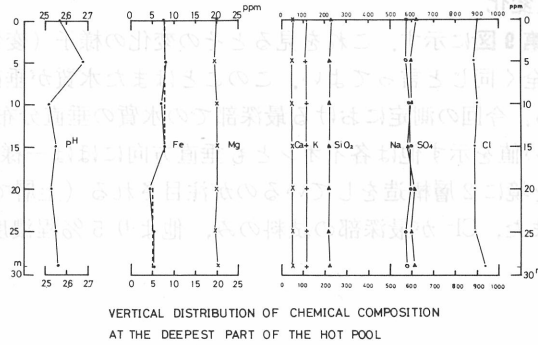
今回は湯沼底の赤色沈澱物についてX線回折を行なった。前回認められた鉱物は磁鉄鉱を除き(前回でも磁鉄鉱はX線回折では認められていない)すべて認められ、量的な対応もほぼ一致している。今回新たに見出された鉱物にジャロサイトがあるが、前回においても岸の岩石表面の付着物の中には多量に認められている。ジャロサイトは大気中や地表水の影響を受ける環境下で形成するものと考えられるので、今回これが微量ながら見出されたことは、湯沼水中に占める地表水の影響が相対的に強まったことを示すのであろう。



第8図 表面水温の変化

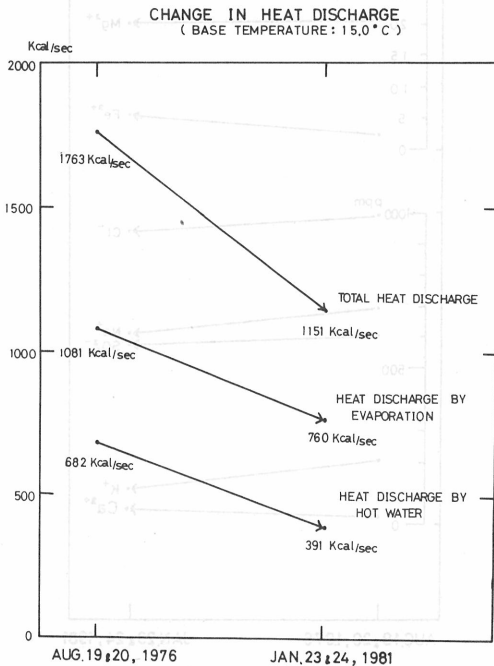


第9図 湯沼底水質の変化

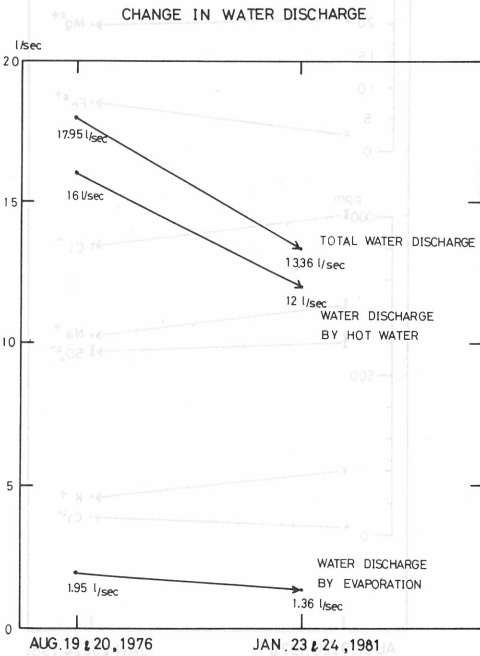


第10図 最深地点における化学成分垂直分布 (1981年1月23・24日)

湯沼からの放熱は蒸発によるものと流出温水によるものとに分けられる。蒸発による放熱量の値は湯沼表面5ヶ所で測定された蒸発量値に基づいて計算した。流出温水量は流速法で求めた。基準温度を15℃として求めた放熱量値は蒸発によるもの：760kcal/sec、流出温水によるもの：391kcal/sec、合計1151kcal/secとなった。これを前回のもの(基準温度を15℃に換算しなおした)と比較して示したのが第11図である。これによればいずれの放熱量も減少しており、全放熱量としては約35%の減少である。一方、放出水量の変化を示したのが第12図である。これによれば蒸発水量、流出温水量共に減少している。全放出水量としては前回と比較して約26%の減少である。放熱量、放出水量の算出における手続きは測定方法をも含め前回と今回とはほとんど同じである。また測定精度は10%以内と考えられるので放熱量・放出水量ともにその変化は有意であると考えられる。



第11図 放熱量の変化 (基準温度：15.0℃)



第12図 放出水量の変化

6. 各量の変化の総括

以上において各観測量についての変化を記してきた。それをまとめてみると以下のようになる。水深すなわち湯沼底の地形には若干の変化が見られるが湯沼西半の漏斗状の凹地などは依然として存在しており、大きな変動があったとは認められない。一方、水温、放熱量及び放出水量は明瞭に低下している。ただ、最深部における最高温度は約 136°C でほとんど変わっていない。水質に関してはpHが若干増加している。 Ca^{2+} 及び Fe^{3+} は増加したがその他の成分 K^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 Na^{+} 、 Mg^{2+} は減少した。湯沼底の赤色沈澱物の生成鉱物にはほとんど変化は認められない。

III. 考 察

水温・放熱量・放出水量はいずれも減少している。これらの観測値から血の池地獄における熱水系のモデルを組立て、それに関して考察することにする。熱水系モデルを組立てる上で次のような仮定をおく。

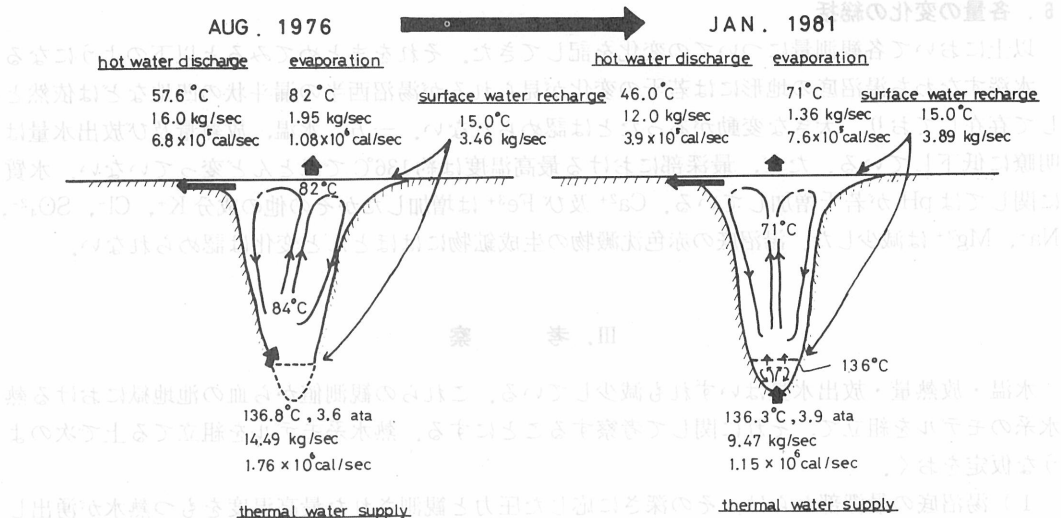
- 1) 湯沼底の最深部からは、その深さに応じた圧力と観測された最高温度をもつ熱水が湧出している(温度・圧力条件からここでは液体である)。
- 2) 湯沼底から湧出する熱水と湯沼表面、場合によっては底部付近から流入する低温の水との混合によって湯沼内の高温水は形成されている。
- 3) 湯沼内では熱も水も平衡状態にあるとする。すなわち、地下及び地表から供給される熱及び水は蒸発及び温水の流出によって同じ量だけ放出されている。
- 4) 湯沼に流入する地表水並びに冷地下水の温度は年平均気温にほぼ等しく 15°C とする。

a) 1976年8月の熱水系モデル

温度 136.8°C 、圧力 3.6 気圧(26m)の熱水のエンタルピーは 15°C を基準とすると 121.5cal/g となり、全放熱量がこれによってまかなわれているとすれば湯沼底からは 14.49kg/sec の熱水の湧出が必要とされる。地表から放出される全放出水量は 17.95kg/sec である。従って、 $17.95 - 14.49 = 3.46\text{kg/sec}$ が地表水又は冷地下水起源となる。この流入する低温の水であるが血の池地獄の場合、地表からの直接の雨水流入の取水面積はどんなに大きくとったとしても水面の表面積の数倍程度であろう。従って地表からの直接流入量は全流入量の10%以内である。すなわち、血の池地獄においては湯沼底のどこからか低温の地下水が流入しているものと推定される。いずれにしても、この時点における熱水系は第13図左に示されたようなものとなる。湯沼内の垂直水温勾配はやや大きく、また熱水湧出地点と表面水温最高部分が水平的にずれていることから、比較的勢力の強い熱水の上昇流がやや斜め上方に存在しており、この上昇成分に支配された対流の流れ、温度のパターンをしているものと考えられる。

b) 1981年1月の熱水系モデル

温度 136.3°C 、圧力 3.9 気圧(29m)の熱水のエンタルピーは 15°C を基準とすると 121.5cal/g となり、a)と同様な考え方をとれば湯沼底からは 9.47kg/sec の熱水が湧出していることになり、地表水又は冷地下水起源の水は $13.36 - 9.47 = 3.89\text{kg/sec}$ となる。この場合も大部分の水は湯沼底のどこからか地下水として流入しているものと考えられる。この時点の湯沼内温度の特徴は24~25m深を境界層として上下2層にわかれ、各々の層内では温度は極めて一様である。従ってこの時点では対流層は上下2層に分かれており、各層内での混合はかなり良く行なわれていると考えられる。このことが湯沼内の温度の一様性を示すとともに、表面水温の一様性を示す



Thermal and water balance of Hot Pool "Chinoike-Jigoku" Beppu, Kyushu

第13図 血の池地獄の熱水系モデル

左：1976年8月の時点，右：1981年1月の時点

原因となっていると考えられる。なお、垂直分布が24～25mで急激に変化しているが、この深さ近くに冷たい地下水が湧出している可能性が考えられる。これに関して根拠は明確ではないが約20mの深さに約20°Cの冷水が湧出している証拠があるとの報告がある (Sekioka, 1977)。1981年1月における熱水系の様子を第13図右に示した。

以上で推定された熱水系の変化を考えると、湯沼底最深部より湧出する熱水の状態にはほとんど変化はないが(3.6～3.9気圧, 136°C, エンタルピー136.6cal/g (0°C基準)), その量が大きく変わったことがまずあげられる(14.49kg/sec → 9.47kg/sec, 35%の減少)。一方、流入する低温の水の量は3.46kg/secから3.89kg/secと若干増加しているように見えるがこの変化は測定精度からみて必ずしも有意なものとは言えない。しかしながら、いずれにしても全流入水量中に占める地表水及び冷地下水の割合が上がり(19% → 29%), 温度低下に大きな寄与をすることになったと考えられる。このような流入水の変動がすでに述べたような湯沼内の水の流動パターンの変動にも影響を与えたものと思われる。

次に流入する水の変動に伴う水質変化について考察する。湯沼底から噴出する温度・圧力はすでに記したようにほとんど変動はない。噴出する場所もほとんど変わっておらず、このような場合、湯沼底から湧出する熱水の化学成分も変わっていないであろうと考えられる。いま、ある化学成分の含有率を熱水中でP、地表水並びに冷地下水中で0とすると1976年8月の時点では単位時間当りに生成される混合水中に含まれるその化学成分の含有率は $14.49P / (14.49 + 3.46) = 0.81P$ である。一方、1981年1月の時点では $9.47P / (9.47 + 3.89) = 0.71P$ となる。このような変化の場合、含有率の相対的変化量は $[(0.81P - 0.71P) / 0.81P] \times 100 = 12\%$ となる。すなわち、上で記したような単純な稀釈モデルによれば、各化学成分の濃度は前回に比較して今回は一様に10%程度低下することになる。実際の化学分析値の多くは数～10%程度の減少を示している。しかしながら、増加している化学成分(Ca²⁺, Fe³⁺)もあり、単純な稀釈モデルを採用するがぎり、それは説明しがたいが、混合する地下水に含まれるCa²⁺, Fe³⁺が多ければこのような困難は避け

られる。実際血の池地獄周辺の湧泉の中には Ca^{2+} が $69.22\text{mg}/\ell$ (大分県衛生研究所, 1968) と高いものが見られる。ただ湯沼底から湧出する熱水の化学成分が全く変らなかったとも言えないが特定の成分だけが変わるというのは考えにくいであろう。

なお、湯沼底から湧出する熱水量の減少の原因は地震に伴う変動と推定される。地震後、長期間にわたって、攪拌された赤色沈澱物が湯沼中を浮遊していたことを考えると地震時に湯沼底は大きな震動を受けたに違いない。それに伴って熱水の湧出通路がせばめられ、湧出量が減少したか、移動した沈澱物によって湧出口がせばめられて湧出量が減少した可能性が考えられる。このように1976年8月と1981年1月の間における血の池地獄における諸量の変化の原因としては湯沼底からの熱水湧出量の減少が第1にあげられる。

IV. ま と め

1981年1月23・24日、血の池地獄で各種の測定を行なった。この結果を1976年8月19・20日に行なわれた結果と比較したところ、水深すなわち湯沼底の地形には大きな変化は認められなかったが水温・放熱量・放出水量はいずれも低下していることが認められた。この低下の原因は湯沼底から湧出する熱水の量が減少したものと考えられる。熱水の湧出量の減少は1980年12月12日の地震に伴って、熱水上昇の通路または湧出口がせばめられたことによるのではないかと推定される。湯沼中の各化学成分は概ね1976年8月に比して、1981年1月の時点では濃度が減少している。このことも熱水湧出量の減少、流入地表水及び地下水の相対的な増加として説明される。

謝 辞

血の池地獄の現地調査にあたり、種々の便宜を与えられた支配人中村清典氏及び有益な助言を与えられた山下幸三郎博士に厚く御礼申し上げます。また現地調査においては九州大学大学院学生、古賀敏博・海江田秀志、学生、山本敏雄・河村英夫・徳永晃・彦田文雄の諸君の協力を得た。記して感謝致します。

引用文献

- 1) 大分県衛生研究所：温泉分析書，大分県温泉調査報告，13報，12 (1968)。
- 2) 奥西一夫・横山康二・奥田節夫：簡易自動採水器の試作について (その2) —— ボーリング孔用深度別採水器 ——，京都大学防災研究所年報，第19号，B-1，421-427 (1976)。
- 3) M. Sekioka : A Micrometeorological Estimation of the Water and the Heat Discharged in a Hot Pool, Arch. Mete. Geoph. Biokl., Vol. 25, No. 3, 283-290 (1977)。
- 4) 山下幸三郎・吉川恭三：別府の血の池地獄について，第26回日本陸水学会大会講演要旨集 (1961)。
- 5) 吉田哲雄・湯原浩三・中江保男・野田徹郎：別府「血ノ池地獄」の温泉水及び沈澱物について，温泉科学，第29巻，第1号，10-18 (1978)。
- 6) 湯原浩三・吉田哲雄・中尾晴次・大島勝文：別府血の池地獄の放熱量，温泉科学，第29巻，第1号，3-9 (1978)。