

「水文科学が解き明かす不思議な天然水」

3. 様々な色を呈する別府の地獄

大沢 信二^{*1}

Hydrological understanding of natural waters with unique characteristics

3. Various colors accompanied by hydrothermal activities in Beppu

Shinji OHSAWA^{*1}

I. はじめに

別府と言えば地獄, 地獄と言えば別府というくらいに, 別府の地獄は有名である。最近 (平成 21 年 7 月 23 日), 別府の地獄のうち, 「血の池」, 「海」, 「龍巻」, 「白池」の四つの地獄が『別府の地獄』として国の名勝に指定された。大分県内にある名勝としては 1923 年 (大正 12 年) に指定された耶馬溪に次いで 86 年ぶりの 2 件目で, 11 項目ある名勝指定基準のうち「火山, 温泉」での指定で, 温泉としては初めてである。指定理由は「日本古来の温泉地として名高い別府の中でも, 独特で多様な色彩・形態の下に湧出する観賞上の価値, 名所的・学術的価値の高い泉源である」となっている。さらに別府の地獄を代表する海地獄と血の池地獄については, それぞれ, 歌人の与謝野晶子, 俳人の高浜虚子が神秘的な色彩を詠んだ作品を残しているということを最近知り, 個人的には地獄の色は多くの人々の関心の的であるに違いないという思いがますます強まっている。この連載「水文科学が解き明かす不思議な天然水」の対象の一つに別府の地獄を色彩的に特異な水としてリストアップされ, 執筆の機会を与えて下さり, さらに原稿に目を通して文章の改善に協力された日本水文科学会の編集チームの方々にまずもって感謝申し上げる。

さて, これから, 血の池地獄, 海地獄, 青い熱水を湛えるそのほかの地獄の順にこれまでに公表された研究論文の内容を中心にすえ, その後得られた知見も交えながら, 地獄の色について解説を行っていこうと思うが, 地獄という言葉にあまり強くとらわれず, 温泉の色に関する論説であるというふうに少し広くとらえて読んでいただけるとありがたい。なお, 別府には紺 (色) 屋地獄と名づけられた灰黒色の泥水を湛えた湯沼が存在するが, 色の原因は泥に含まれる微細な黄鉄鉱 (FeS_2) であるというくらいの情報があるだけなので (大沢・由佐, 1997), 所在地のみの紹介とする (Fig. 1; Table 1)。

II. 血の池地獄

別府市街地の北端にある柴石地区に存在する熱水性の池であり (Fig. 1; Table 1), 池の底に沈殿した赤鉄鉱 (鉄さびと同じ物質) を主体とする温泉沈殿物により, 池全体が赤く色づいていることがその名称の由来となっている。8 世紀中頃までに編纂された豊後風土記に出てくる赤湯の泉が血の池地獄であるとされ, その信憑性は高く, 1300 年ほどの歴史をもつ別府で最も由緒ある熱水池ということになる。なお, 江戸時代に入ると文人の往来が増えたこともあって, 赤湯の泉の記録が多く残されており, この頃から「血の池」の呼び名が併用

* 1 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 Institute for Geothermal Sciences, Kyoto University

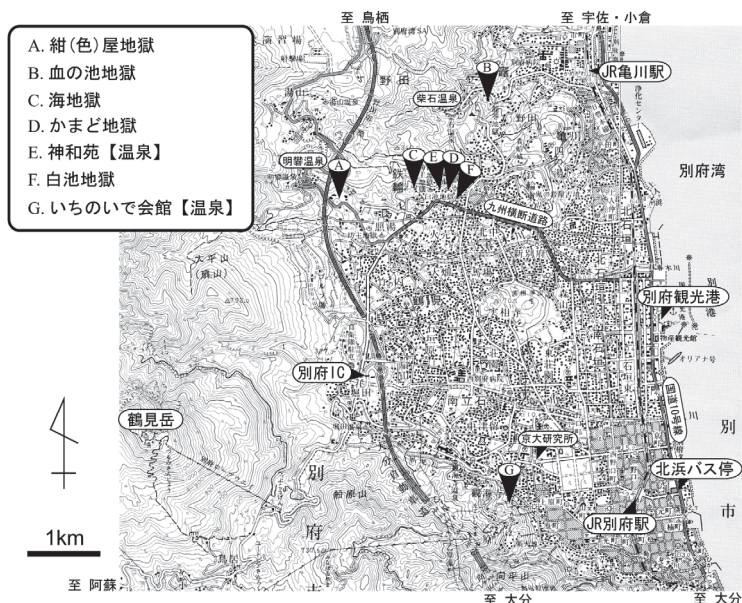


Fig. 1 本論文で取り上げた地獄や温泉の所在地
(国土地理院発行の5万分の1地形図「別府」と「大分」をつなげたものの上に表示)

Table 1 本論文で取り上げた地獄や温泉の所在地の一覧

地獄あるいは温泉の名称	所在地の地名・番地	緯度*	経度*	Fig. 1 上の記号
紺(色)屋地獄	大分県別府市明礬5	33.316	131.457	A
血の池地獄	大分県別府市野田778	33.327	131.478	B
海地獄	大分県別府市鉄輪559-1	33.316	131.469	C
かまど地獄	大分県別府市鉄輪662	33.316	131.472	D
神和苑	大分県別府市御幸6組	33.313	131.468	E
白池地獄	大分県別府市鉄輪278	33.315	131.474	F
いちのいで会館	大分県別府市上原町14-2	33.278	131.482	G

注) *: 世界測地系による表記

されるようになったらしい。後述のように、池の底に見られるロート状の形状から、池の元になる地形は水蒸気爆発で形成されたと推測され、形成後も1875年(明治8年)以来、数年から10数年の間隔で9回の水蒸気爆発があったと伝えられている極めて活動的な熱水池である(星住ほか, 1988)。

現在の血の池地獄は正三角形に近いおむすび型の形状をした表面積1,082m²程度の熱水池で、中央部が最も深く30mほどの深さがあり、断面はロート状を呈している(湯原ほか, 1978; Fig. 2)。その最深部には熱水の湧き出し口があり、湧出温度は136℃にもなる。温泉沈殿物は、主として池の水の流出口がある東側の浅瀬(深さ数10cm)に広

く沈殿しており、それによって一帯が赤くなっている。湧出水量は、一時期は1日1,000トンを超え、流出先の新川が血の池地獄の沈殿物で赤く染まったと聞かすが、現在はそのような顕著な光景が見られないことから、熱水の湧出量は減少していると推測される。池の水は、流出域の表面近くでも60数℃あり、ナトリウムイオン(Na⁺)、塩化物イオン(Cl⁻)を主要成分とする、塩分濃度=2.6g/ℓ程度の強い酸性(pH=2.5程度)の温泉水で、柴石地区の温泉を代表する泉質である。名称の由来となった池の底に堆積する赤色系の温泉沈殿物には、上述の赤鉄鉱の他に、クリストパル石、酸性条件で安定な粘土鉱物であるカオリナイ

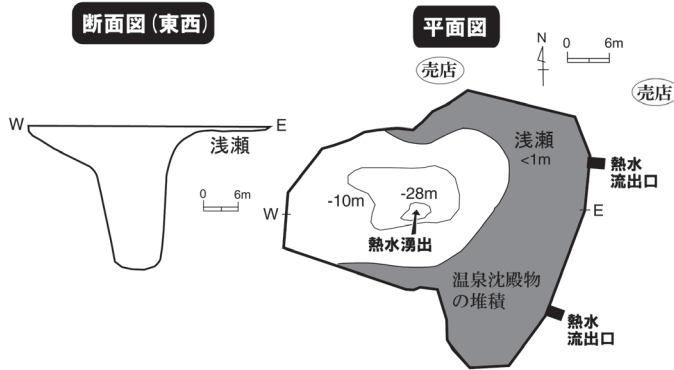


Fig. 2 血の池地獄熱水池の水深等を記した平面図と東西断面図
(湯原ほか, 1978 を修飾)

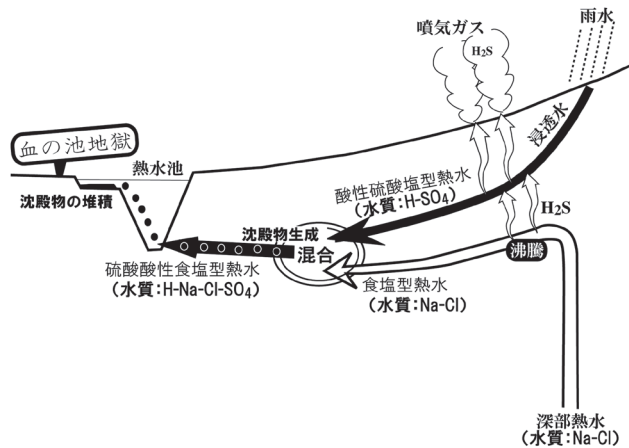


Fig. 3 血の池地獄の温泉沈殿物の生成機構を説明する図
(大上ほか, 1998 を修飾)

トなどが含まれる(吉田ほか, 1978)。前述のように、池の赤い呈色は温泉沈殿物に含まれる赤鉄鉱によるもので、池の水そのものは無色透明である。

赤色の主要な原因となっている赤鉄鉱は、池の底から湧出する熱水に付随するものであり、鉄分を多く含む酸性硫酸塩型水質の熱水に、より高温の Na-Cl 型水質の熱水が混合して地下深部で生成すると考えられている(大上ほか, 1998; Oue *et al.*, 2002; Fig. 3)。また、1990 年頃より地獄の色は赤から橙色に変化してきており、それは温泉沈殿物中に鉄ミョウバン石という黄色系の熱水性鉱物が加わるようになったためであることが確認され(大沢ほか, 1996)、熱水の混合割合の変化(高

温の Na-Cl 型水質熱水の混合率が低下した)が原因であると説明されている(大上ほか, 1998)。

このように熱水活動の変動に対応して血の池地獄の色が変化するらしいという新たな認識がもたれるに至り、池底に層状に堆積する温泉沈殿物から熱水活動の変遷を解読しようという試みがなされた(大上ほか, 2001)。堆積物コアサンプラーによって温泉沈殿物の堆積層が表面から深さ 40cm までくり貫かれ、年代測定(^{210}Pb 法)が行われた結果、試料の最下部(40cm)は 130 年前に堆積した温泉沈殿物であることが確認された。その試料の鉱物分析をもとに過去 100 年ほどの熱水活動が復元され、1950 年代に入って地下の熱

水温度が低下を始めたらしいことが示された。このことは、1927 年（昭和 2 年）以降には水蒸気爆発が起こっていないことと無関係ではないと考えられ、血の池地獄が地下の熱水活動の状況を窺い知る“窓”であることを示している。

別府には、血の池地獄と同様に赤く色づく地獄が散見されるが、そのほとんどが人為的に作られたものであり、その中にある天然の血の池地獄は希少な存在である。そのために、これまでに多くの自然科学的研究が実施されることになり、別府に存在する他の地獄に比べて、その素性や特徴がより明らかにされてきた地獄である（上記の論文の他に、高松ほか、1998）。

Ⅲ. 海地獄

別府市街地の鉄輪（かんなわ）地区に存在する熱水性の池の一つであり（Fig. 1; Table 1）、湛えられる水が海のように透明な青緑色を呈することから、その名称が与えられた。およそ 1200 年前（貞観 9 年）の鶴見岳噴火の際に形成されたとされるが、その真偽はさておき、1694 年（元禄 7 年）に別府を訪れた貝原益軒が著した豊国紀行の中に、「・・・山際に、海の地獄とて池有。熱湯なり、・・・」という記述が見られ、構造や規模などが詳しく記載されていることから、少なくとも数百年前には原形となる熱水の池が存在していたと考えられる。

現在の海地獄は表面積 260m² 程度、直径 10m ほどの小さな熱水池で、湧出水量は 1 日 3,600 トン（過去のデータ）と言われている（星住ほか、1988）。池の底が縁辺部から中央部にかけて急激に深くなるロート型の形状をもつことから、元の地形は血の池地獄と同様に水蒸気爆発で形成された窪地であると推測される。池の最深部は目視で確認できな

いが、水の透過通り具合から見て、10m を優に超える深さであると考えられる（200m との情報もあるが、熱水を供給する温泉井の深さと混同していると思われる）。池の水は、水温が 60 数℃（流出口付近で計測）、Na⁺ と Cl⁻ を主要成分とする、塩分濃度が 2.5g/ℓ 程度のやや強い酸性（pH = 3.4 程度）の温泉水であり、鉄輪地区の温泉を代表する泉質の一つである。地表から流入する沸騰熱水の水質が池の水質と異なることから、池の底からの別系統の熱水の流入があると考えられる。池の底には、白色系の温泉沈殿物が堆積しており、石英や粘土鉱物の一種であるカオリナイトが含まれる。

海地獄の熱水の色は、現地の観光案内では「硫酸鉄による呈色である」と説明されているが、水に溶けている鉄イオンの濃度はわずかであり（0.2mg/ℓ）、この程度の濃度では水深 1m でも太陽光はほとんど吸収されず（どの波長でも吸光度 <0.001）（大沢ほか、2003）、この説は科学的な根拠に乏しかった。最近、熱水池の発色のメカニズムに関する本格的な研究が行われ、水本来の色（水分子による太陽光の赤い光の吸収によって青っぽい緑に見える）に、池の水に浮遊する微細な粘土鉱物による太陽光の散乱（レイリー散乱^{注1}）で現れる青色が重なり、青緑色を呈しているという説が提唱された（大沢ほか、2003）。そしてごく最近行われた Takamatsu *et al.* (2010) による詳細な研究により、その内容が検証・確認され、先行研究において種類が不明であった粘土鉱物は、カオリナイトであることが示された（Table 2; Fig. 4）。このように、海地獄の熱水は、外洋の海の色や南方の沿岸海域で見られる海の色と同様な物理的からくりで色づく水であることが明らかにされ、単に色という外見の点だけでなく、発色の

注 1) ここでは空の青さと雲の白さを例にして、レイリー散乱とミー散乱について説明する。エアロゾル（大気中の微細粒子）が浮遊している大気中に太陽光（白色光）が注ぎ込むと、エアロゾルの粒径が太陽光の波長（0.4μm から 0.7μm）より十分小さい場合には、入射太陽光の赤色の成分（波長の長い部分）はエアロゾルに邪魔されることなくそのまま通過するが、青色成分（波長の短い部分）はエアロゾルにぶつかり散乱される。この散乱された青い光だけが私たちの目に届き、大気（空）が青く見える（実際は空気分子や大気のゆらぎも関与していると言われている）。このような微細粒子による短波長光の選択的な散乱現象を、レイリー散乱と呼んでいる。一方、浮遊する微粒子のサイズがそれより大きい箇所が大気中に存在すると、波長の長い部分の光も短い部分といっしょに散乱され、全ての色の光が私たちの目に届くので、その場所は白く見える。それが雲であり（雲の正体は微細粒子を核に持つ水滴）、そのような比較的大きなサイズの粒子による光の非選択的な散乱現象をミー散乱と呼ぶ。

Table 2 青く色づく熱水や温泉水中のレイリー散乱に關与するコロイドの濃度

地獄あるいは温泉の名称	調査日	レイリー散乱に関する コロイドの種類	コロイドの濃度* (mg/ℓ)	色
かまど地獄〈三丁目〉	1997年10月	シリカ	27	青白色
神和苑の露天風呂	1997年11月	シリカ	138	青色（湯舟にお湯 をはって2日目）
いちのいで会館〈金鉢の湯〉	1997年10月	シリカ	104	青色
いちのいで会館〈景観の湯〉	1997年10月	シリカ	8	青白色
海地獄	2002年3月	カオリナイト	0.59	緑青色
同上	2003年1月	カオリナイト	<0.1	青緑色（レイリー 散乱なし）

注) * : 粒径は0.025 μm から0.45 μm の間にあると考えられる。孔径の異なるメンブレンフィルターでろ過・分別して分析。

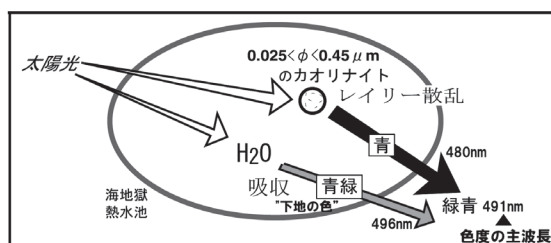


Fig. 4 海地獄の熱水の着色メカニズムを説明する図 (大沢ほか, 2003 を修飾)。色度の主波長とは, Fig. 5 に表わした色度図上の無彩色点から対象の xy 座標を通るベクトル (色相に対応) がスペクトル軌跡 (釣鐘型のアウトライン部分) と交差する点の波長をいう。

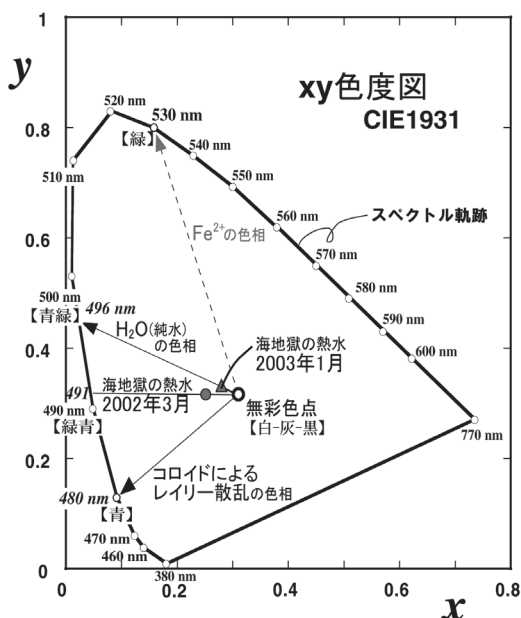


Fig. 5 色度図上に表わした海地獄の熱水の色の変化。この色度図は国際照明委員会 CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) が 1931 年に策定した国際表示法であり、無彩色点を始点とするベクトル上にある測定データはすべて同じ色あいであることを示し、ベクトルの長さの違いが彩度の違いとして表わされる。説明の詳細については、コニカミノルタのホームページ (<http://www.konicaminolta.jp/instruments/knowledge/color/part4/index.html>) や色彩学の教科書を参照された。2003 年 1 月は Fig. 4 に示されているコロイドによるレイリー散乱が加わらず、水分子による光の吸収のみで色づいていることが表現されている。

メカニズムの面からも、海を冠するその名称が当を得たものであることが示された。さらに、池の水の色は、コロイド濃度の変動によって変化していることも明らかにされており（大沢ほか，2003；Fig. 5; Table 2），その原因説明は海地獄における今後の研究課題のひとつとなっている。

Ⅳ. 青い熱水を湛えるそのほかの地獄

別府では海地獄以外にも同様に青く色づく地獄や温泉が存在するが，それらの発色メカニズムは海地獄のそれとやや異なることが明らかにされており，しかもこちらの方が別府ではより一般的であることが分かっている（大沢，2004）。例えば，かまど地獄（Fig. 1; Table 1）にある3丁目や5丁目と名づけられた熱水池が代表的なものであり（水温は50℃から60℃くらい），入射太陽光のレイリー散乱が原因で青く着色しているという点で海地獄とは共通しているが，散乱の原因となるコロイドがシリカであることが異なっている。水質も中性のNa-Cl型であり，海地獄と異なる。シリカは熱水や高温の温泉水に溶存する主要成分の一つで，地表に湧出する前は最小単位の分子（モノマー）として存在するが，湧出後水温が低下すると，脱水縮合反応と呼ばれる化学反応により重合を始め，コロイド大（粒径1nm～1μm）に成長していく。Fig. 6に示すように，シリカコロイドの粒径が可視光の波長よりやや小さいくらいになったときに，レイリー散乱により水は青く見える。Table 2には，実際に青く色づいている熱水や温泉水について，レイリー散乱に関与する粒子サイズ範囲のシリカコロイド濃度の分析結果を示した。前述の海地獄だけが発色の原因となるコロイドの種類が異なり，しかもレイリー散乱による青色に水自身の色（青緑色）が重なって着色しているのはその含有量が数mg/ℓより低いということに関係するらしいことも示唆されており，レイリー散乱によるはっきりとした呈色が見られる濃度のしきい値が存在することを暗示している。

さらにシリカコロイドが成長して粒径が1μm程度以上になると，水の中では入射太陽光に対し

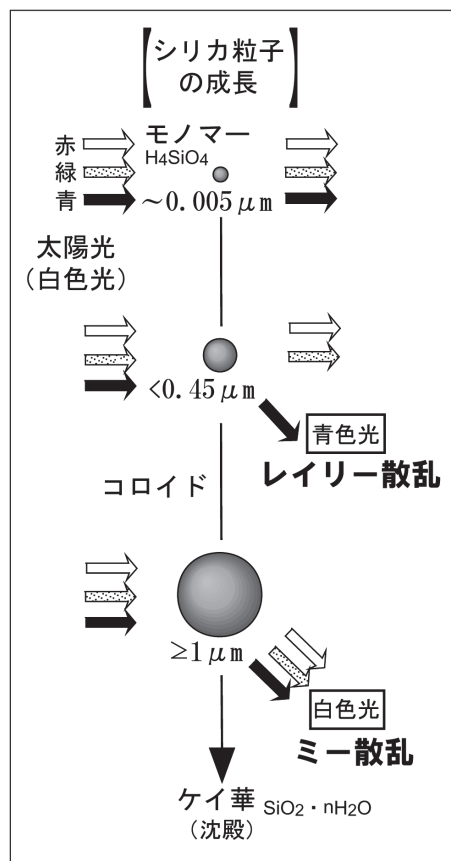


Fig. 6 熱水・温泉水に溶存するシリカ粒子の成長と水の呈色の関係の説明する図（大沢，2004を改変）

てミー散乱^{注1)}が起こって熱水・温泉水は乳白色状態となる。そして最終的に溶存シリカは水に浮遊していることができなくなるほどの大きさまで成長し，ケイ華と呼ばれる温泉沈殿物として私たちの目の前に姿をあらわす。このように，シリカによる熱水・温泉水の発色（無色透明から青）ならびに変色（青から白濁）は，その粒子成長過程にともなってあらわれる現象であり，その様子は旅館神和苑（Fig. 1; Table 1）の露天風呂でよく観察できる（Ohsawa *et al.*, 2002; 大沢，2004）。また，オーナーの話によれば，冬場の発色・変色の進み具合は夏場に比べて速いらしい。この一連の変色現象からの類推によって，白池地獄（Fig. 1; Table 1）で見られる温泉の白濁は，シリカ粒子

成長の最終段階で出現する粒径の大きなシリカコロイドによるミー散乱の産物であると考えられ、白池地獄の水温が40℃未満と低いことから、急激な温度低下によってシリカの重合は速く進み、粒径の小さなコロイド状態に置かれる時間が短く、結果として青く見ることがないと考えられている（大沢・由佐, 1997）。

さて、レイリー散乱で水を青く色づかせるシリカコロイドの大きさは正確にはいかにほどであろうか？ この問いに答えを出すための実験を関係各位の好意により行うことができ、お披露目できる結果が得られたので、ここで紹介したい。Fig. 7の左の写真は、白濁の程度が少なく透明感の高い青い中性Na-Cl型水質の温泉水（いちのいで会館（Fig. 1; Table 1）の金鉱の湯より採取）を0.025 μm のメンブレンフィルターでろ過し、そのメンブレンフィルター表面を電子顕微鏡で撮影したものである。粒径のそろった球形の粒子が映し出されており、大きさは100nm すなわち0.1 μm に満たないことを知ることができる。同じく右側のグラフは、白濁の程度・青さの度合いがやや異なる同種の温泉水（旅館神和苑の露天風呂より採取）について光散乱光度計で測定して得た粒度分布図であり、30～40nm（0.03～0.04 μm ）あたりに分布のピークがあり、可視光の波長に比べて十分に小さいことが示されている。両者のシリカコ

ロイドの粒径には若干の違いがあるが、それは両者の呈色状態がまったく同じではないことに関係していると考えられ、いずれにしてもレイリー散乱の原因となるシリカコロイドの粒径は、肉眼では捉えることができない可視光の波長の10分の1から100分の1程度の大きさであると結論してよいであろう。

V. おわりに

別府の地獄の熱水や温泉水を青く色づかせる原因をつくるコロイドは、主としてシリカ、そしてカオリナイトのような粘土鉱物であることが分かったが、別府に限らなければ、それ以外にも硫黄や炭酸カルシウムがコロイドとなって温泉水を青く色づかせることがしだいに明らかにされはじめている（例えば、高松ほか, 2010）。硫黄コロイドについては、 H_2S を多く含む酸性硫酸塩型水質（ H-SO_4 ）の温泉水で色の原因物質になると予想されていたものであり（大沢・由佐, 1997）、すでに強酸性火口湖においては湖水色の原因となる物質であることが確認され（恩田ほか, 2003）、湖底噴気活動にともなうその消長が湖水色の変化を引き起こしていることも指摘されている（Ohsawa *et al.*, 2010）。炭酸カルシウムコロイドについては十分な証拠はまだ提示されていないが、石灰岩地域でしばしば目撃される青白い水が

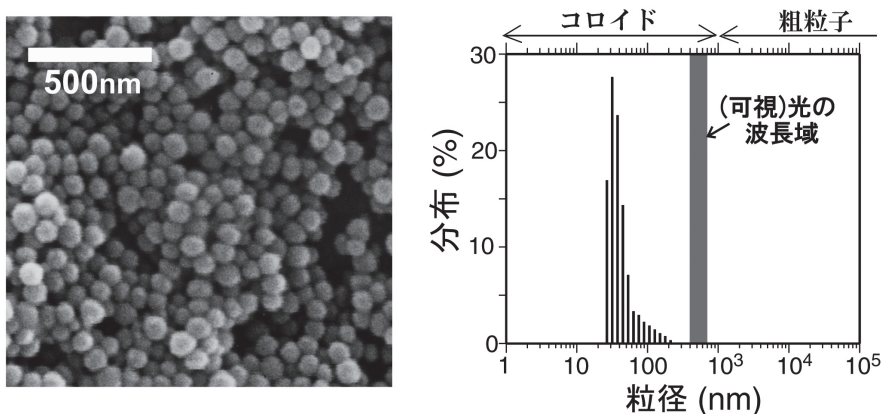


Fig. 7 青い熱水の原因となるシリカコロイドの電子顕微鏡写真（左）と光散乱光度計によるコロイドの粒子径の測定結果（右）

それによるのではないかと予想され、世界的にみると石灰岩の分布は広大であるので、炭酸カルシウムコロイドで色づく天然水は、温泉・地熱・火山に話を限定しなければ、最も普遍的な存在であるかもしれない。今後の研究の進展に期待したい。

最後に、本論文で引用の多い『温泉科学』と『大分県温泉調査研究会報告』に掲載されている論文は、それぞれ日本温泉科学会、大分県のホームページで公開されており、無料でダウンロードできることを紹介しておく（『温泉科学』は一部ダウンロードに制限あり）。本解説文とともに活用されることになれば幸いである。

温泉科学

http://www.soc.nii.ac.jp/bsj3/back_number/index.html

大分県温泉調査研究会報告

<http://www.pref.oita.jp/site/onsen/onsen-kenkyu.html>

参考文献

- 星住英夫・小野晃司・三村浩二・野田徹郎（1988）：別府地域の地質。地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，131p.
- 大上和敏・大沢信二・中川理恵子・高松信樹・由佐悠紀（1998）：別府血の池地獄の色彩変化に関わる沈殿物の鉱物組成・温泉水の化学組成の変化。温泉科学，**48**，157-165.
- 大上和敏・大沢信二・由佐悠紀（2001）：別府血の池地獄の変遷過程の解説。大分県温泉調査研究会報告，**52**，37-43.
- 大沢信二・大上和敏・由佐悠紀（1996）：別府血の池地獄の温泉沈殿物の色彩変化。温泉科学，**46**，13-19.
- 大沢信二・由佐悠紀（1997）：温泉の色について。大分県温泉調査研究会報告，**48**，41-49.
- 大沢信二・恩田裕二・高松信樹（2003）：海地獄の呈色に関する色彩学的・地球化学的研究。大分県温泉調査研究会報告，**54**，15-24.
- 大沢信二（2004）：青い温泉水はどのようにしてできるのか。日本温泉科学会 西村進編『温泉科学の最前線』。ナカニシヤ出版。5-21.
- 恩田裕二・大沢信二・高松信樹（2003）：活動的強酸性火口湖の呈色因子に関する色彩学的・地球化学的研究。陸水学雑誌，**64**，1-10.
- 高松信樹・大上和敏・大沢信二・加藤尚之・由佐悠紀（1998）：別府血の池地獄沈殿物コアの主要および微量元素の垂直分布。温泉科学，**48**，36-43.
- 高松信樹・西岡光雄・福島菜月・桑原直子（2010）：緑色温泉の呈色機構。温泉科学，**60**，119-133.
- 吉田哲雄・湯原浩三・中江保夫・野田徹郎（1978）：別府「地の池地獄」の温泉水及び沈殿物について。温泉科学，**29**，10-18.
- 湯原浩三・吉田哲雄・中尾晴次・大島勝文（1978）：別府血の池地獄の放熱量。温泉科学，**29**，3-9.
- Ohsawa, S., Kawamura, T., Takamatsu, N. and Yusa, Y. (2002): Rayleigh scattering by aqueous colloidal silica as a cause for the blue color of hydrothermal water. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **113**, 49-60.
- Ohsawa, S., Saito, T., Yoshikawa, S., Mawatari, H., Yamada, M., Amita, K., Takamatsu, N., Sudo, Y., Kagiya, T. (2010): Color change of lake water at the active crater lake of Aso volcano, Yudamari, Japan: is it in response to change in water quality induced by volcanic activity? *Limnology*, **11**, 207-215.
- Oue, K., Ohsawa, S., Yusa, Y. (2002): Change in Color of the Hot Spring Deposits at the Chinoike-Jigoku Hot Pool, Beppu Geothermal Field. *Geothermics*, **31**, 361-380.
- Takamatsu, N., Iwasaki, A., Kunugi, M., Ohsawa, S., Matsumoto, G.I. (2010): Some blue colored lake and pond waters in Japan. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **30**, 1416-1420.