

本研究の目的は、火山湖の存在する活動的火山において、活動の活発度に応じて変動する湖水の色をモニタリングして、色合いやその変化の仕方から、火山がどのような活動ステージにあるのかを判断できるようにすることである。言うならば、「地球科学における色彩学の利用」である。

1. 活動的火山湖

本研究が対象とする火山湖は、「活動的火山湖」である。この講義では、活動的火山湖は、活火山の山頂火口に形成される火山湖で、湖底から吹き込むマグマ性熱水流体(火山ガス)の影響で湖水が高温・強酸性となっており、かつ、火山活動を反映して水温・化学組成・水位等に著しい変動が見られるもののことを言う。火山湖を持つ火山は世界中に 85 あり、完新世の火山 714 のうち約 12%にあたる。そのうち、活動的火山湖の定義にあてはまるものは 20-30 くらいであることが知られている。

2. 「湯溜まり」と「湯釜」-湖水色の違いはなぜ起こる？-

我が国における代表的な活動的火山湖は、阿蘇火山の「湯溜まり」と、草津白根火山の「湯釜」である。両者の火山湖において、それらの湖水の色合いは異なっている。「湯溜まり」の湖水は黄緑色であるのに対し、「湯釜」の湖水は青に近い色を呈している。この色合いの違いは湖水の化学組成の違いにあると考え、2000年に「湯溜まり」「湯釜」において湖水の採取・化学分析を行い、湖水色の測定を行った。

我が国の代表的な活動的火山湖 阿蘇火山の「湯溜まり」と 草津白根火山の「湯釜」



1: 湯溜まり (阿蘇山) 2: 湯釜 (草津白根山)

色の原因を探る調査

湖水の採取・化学分析 と 湖水色の測定



火口の直径=400m, 落差=120m

・湖水の採取・化学分析

「湯釜」の湖水は湖面まで直接近づいて採取が可能なのに対し、「湯溜まり」は直径 400m, 落差 120m の火口内に存在しているため、直接的な採取が非常に困難である。そこで「湯溜まり」では、採水器を吊るしたロープを火口壁の両端に渡し、長さを調節し採水器を降下・上昇させることで採水を行った。化学分析結果のうち、黄緑色の原因



となる Fe^{2+} (緑色)と Fe^{3+} (黄色), 青色の原因となる $0.1-0.45\mu m$ の浮遊単体硫黄の湖水 1L あたりの含有量(mg)に注目する。すると、青色の原因となる浮遊単体硫黄の含有量は「湯溜まり」「湯釜」とも同じオーダーなのに対し、



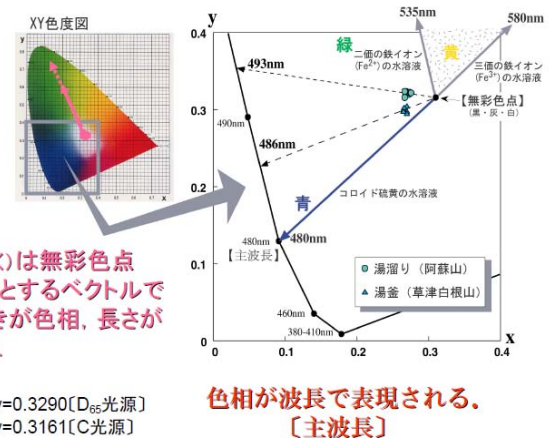
黄緑色の原因となる Fe^{2+} , Fe^{3+} の含有量は「湯溜まり」の方が「湯釜」よりもそれぞれ 2 桁, 3 桁多い値を示した。

このことは、「湯溜まり」の方が「湯釜」よりも黄緑の呈色が強いことを示唆する。

・湖水色の測定

湖水色の評価においては、人間の肉眼による評価では主観的要素が多くなる。色を客観的に評価するためには、色を或るパラメータに数値化できる装置が必要である。そこで本研究では、非接触式色彩計(ミノルタ CS-100)を用いることで、湖水色の数値化を可能にした。この非接触式色彩計は色相が波長で表現されるようになっている。色は無彩色点を始点とするベクトルで表され、向きが色相。長さが彩度を表す。色測定の結果では、「湯釜」の主

湯溜りと湯釜の色測定の結果



色(明度を除く)は無彩色点(●)を始点とするベクトルで表され、向きが色相、長さが彩度を表す。

無彩色点
X=0.3127,y=0.3290[D₆₅光源]
X=0.3101,y=0.3161[C光源]

色相が波長で表現される。
【主波長】

波長は486nm, 「湯溜まり」の主波長は493nmであった。また, Fe^{2+} の水溶液(緑)の主波長は535nm, Fe^{3+} の水溶液(黄)の主波長は580nm, 浮遊単体硫黄の水溶液(青)の主波長は480nmであった。これらをxy色度図上に乗せると, 「湯釜」よりも「湯溜まり」の持つ色のベクトルの成分の方に, 緑・黄色のベクトル成分がより多く含まれていることが明らかになった。

これらの研究から, 火口湖水の色は, 次のような化学反応が関係していることが考えられる。 $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S} + \text{H}_2\text{O}$ を含んだ火山ガス成分が湖底に流入すると, $\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{S} \rightarrow 3\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$ という反応の下に単体の硫黄が生じる。また,

酸(H⁺)により岩石の鉄成分が湖水中に溶出することで, 鉄イオンが生じる。

3. 「湯溜まり」でとらえられた湖水色の時間変化

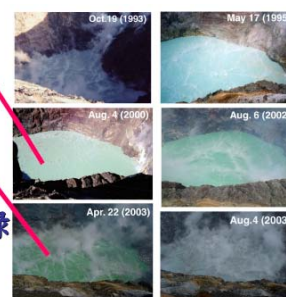
また「湯溜まり」では, 湖底噴火に伴って湖水色が緑青色から黄緑色へ時間変化することが知られていた。このことは色彩計による色度計測からも明らかにされた。色度の変化を時系列で詳しく見ると, 湖底噴火の4~5ヶ月前に湖水の色が青系から黄緑系に変化していることが分かる。色の変化に対応して, 水質にも変化が起こっていた。湖底噴火の前後において, 浮遊単体硫黄の量だけが激減していたのである。

色の変化を時系列で見た図



色の変化と水質の関係

サンプル番号	S1	S2
サンプリング日	2000年8月4日	2003年4月22日
水温(°C)	54	71
pH	0.81	-0.72
Na (mg/L)	1730	6240
K (mg/L)	725	3050
Ca (mg/L)	1670	2150
Mg (mg/L)	2190	7630
Al (mg/L)	5460	14700
Total Fe (mg/L)	4050	16000
Fe(III) (mg/L)	110	198
Cl (mg/L)	28600	117000
SO ₄ (mg/L)	42600	106000
F (mg/L)	2350	11900
SiO ₂ (mg/L)	417	774
コロイド硫黄 (mg/L)	538	12.0
<0.45 μm	55.3	0.1
径 0.45-1.2 μm	15.0	0.5
径 >1.2 μm	468	11.4



湖底噴火
2003年7月10日

鉄イオンは高い濃度で存在するが, コロイド硫黄が激減している。

一般に, 火山活動が活発化して噴気温度が上がると $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が高くなることが知られている。今回のケース

では, 湖水中における $\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{S} \rightarrow 3\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$ の反応において, $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が高すぎたために S(浮遊単体硫黄)

が生成しにくくなり, 湖水の青色が消えたと考えることで, 活動の変化による湖水の色の変化を説明することが可能である。こうした現象は, コスタリカのポアス火山でも観測されており, 湖水の色の変化には火山活動の変動が投影されている可能性が高いことが強く示唆される。このことは, 火口湖の色のモニタリングが, 火山活動の評価に使えるのではないかと期待を抱かせるものである。

4. 火口湖の色彩モニタリングに向けて-新しい火山活動度診断法の構築-

IKONOS衛星画像で見た湯溜り



では, どのように火口湖の色のモニタリングを行うか?そこで目をつけたものが, 可視光域のセンサーを搭載した人工衛星である。人工衛星を用いることで, 容易にモニタリングが可能になるものと思われる。ただし要件として, 活動的火山湖の存在する地域を最低1ヶ月間隔で廻ること, 火口湖撮影において十分な空間分解能を持つセンサーを搭載していることが人工衛星に求められる。最初に注目した観測衛星はアメリカの IKONOS 衛星である。1m という極めて高い解像度は湖面を浮遊する硫黄をもとらえるが, 1ショットにかかる費用が非常に高い。現在は, 解像度は IKONOS 衛星には劣るものの, コストを大幅に削減可能な日本の陸域観測技術衛星「だいち」を用い, 阿蘇火山の「湯溜まり」において実証実験を行っている。具体的なデータ処理方法は, 衛星画像か

ら RGB 値を抽出し、RGB 値を Yxy 色度に変換して、xy 色度図上に表示させるというものである。しかしながら、撮影対象直上の大気の状態、光源の日変化・季節変化により、火山活動とは直接関係のない変動が衛星画像の色合いに乗ってしまう可能性がある。今後、「湯溜まり」における衛星と地上の湖水色の同時観測・大気状態の補正方法の構築を行い、上記の問題点を克服する予定である。また、人工衛星による観測対象を、阿蘇火山の「湯溜まり」のみならず、世界各国の活動的火山湖にも広げることで、活動度に対応する湖水色の普遍的関係を見出していきたい。