

火山監視カメラの映像にもとづく噴出物の温度推定

宮城 磯治*・前嶋 美紀**

(2010年12月17日受付, 2012年1月27日受理)

Estimation of Eruptive Temperatures Based on the Color Data of Digital Cameras

Isoji MIYAGI* and Yoshinori MAEJIMA**

For better estimation of the temperature of red-hot volcanic ejecta from their images taken by online digital cameras at night, we studied the applicability of a new pyrometer to the images. Our pyrometer applies the theory of black-body radiation to the color of red-hot object. We examined the color of red-hot volcanic ejecta, a heated basaltic rock with known temperature, and infra-red LEDs. Because of the sensitivity to infra-red ray, a digital camera Nikon D40 can visualize hot basalt specimen at temperatures much lower (ca. 370°C) than the naked eyes (500~550°C). As a side-effect of this capability, color data of the hot basalt discord from the isothermal color lines calculated from the black-body radiation and the CIE colorimetric system. Night photographs taken by the online digital camera aimed at the explosive ash eruptions of Asama volcano (2 a.m. 2 Sep., 2009) indicated that the color of red-hot volcanic ejecta was disturbed by the influence of infra-red ray in the same manner as observed on the heated basalt specimen in the laboratory. As a result, the temperature of the volcanic ejecta would be much lower than their appearance in digital images (e.g., 1000°C) but higher than the detection limit (370°C). Comparison of the color of red-hot volcanic ejecta and isothermal color lines revealed that some of the volcanic ejecta fell along the 600°C isotherm line of the black-body radiation, which suggests that volcanic cloud reduces the influence of infra-red ray. The estimated temperature (600°C) is consistent with those deduced from petrological observation and thermodynamic computation (600~700°C). We conclude that color analysis of the images of red-hot ejecta taken by online digital cameras are useful in temperature evaluation when images suffer less influence of infra-red ray.

Key words: Asama volcano, volcanic bomb, CIE, black-body, webcam

1. はじめに

噴出物や火孔の温度は、刻々と変化する火山の活動状態を把握するうえで有用な情報である。近年の通信技術の発達、電子撮像機器（デジタルスチルカメラやデジタルビデオカメラ）による高頻度な観測を可能にした（前嶋・他, 2005）。火山を監視する電子撮像機器は、夜間に、赤熱した噴出物等を映すことがある（例えば：2011年1~2月の霧島火山新燃岳（鹿児島県始良・伊佐地域振興局）、2009年2月2日の浅間山（まえちゃんねっと）、2008年4月頃以降の桜島（国土交通省）、2007年7月のハワイのプウ・オーオー（米国地質調査所ハワイ火山観

測所）、2003年の十勝沖地震の発生直後の樽前火山の噴気孔周辺（寺田・他, 2004））。

高温物体の発する可視光の色調は古くから温度の推定に利用されている。温度と色の対応は、700°Cでは暗赤熱、900°Cでは桜赤熱、1000°Cでは鮮明な桜赤熱、1200°Cでは鮮明な橙黄熱である（理科年表、物理/化学→熱と温度→高温度と色）。この関係を火山監視カメラの映像に適用すると、例えば2009年2月2日の浅間山の噴出物は1000°C以上の高温が示唆される。しかしながら、電子撮像装置で撮影される高温物体の色調は、肉眼や、従来の銀塩カメラのものとは異なることがある。本稿は夜

* 〒305-8567 茨城県つくば市東1の1の1
産業技術総合研究所 地質調査総合センター
Geological Survey of Japan, Tsukuba Central 7, 1-1-1
Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan

** 〒262-0048 千葉県千葉市花見川区柏井4-50-7-306
株式会社 まえちゃんねっと

Maechan-net Ltd., 4-50-7-306, Kashiwai, Hanamigawaku, Chiba 262-0048, Japan

Corresponding author: Isoji Miyagi
e-mail: miyagi.iso14000@aist.go.jp

間の火山監視カメラ映像の正しい解釈と噴出物の温度推定手法の開発を目指して、(1)高温物体の発する光に関する基礎を整理し、(2)映像の色調にもとづく噴出物の温度推定手法を2009年2月2日の浅間山火山監視カメラの画像に対して応用し、(3)この手法の可能性、問題点、解決法を検討する。

一般的な遠隔測温法として、市販の熱赤外カメラ、地球観測衛星(浦井, 1999)、そして赤外線遮断フィルターを外した電子撮像機器等(Saito *et al.*, 2005; Furukawa, 2010)が挙げられる。これらの遠隔測温法は、被写体から放出される赤外線の強度を利用する。観測される赤外線の強度は、噴煙等による吸収・散乱や(温度の過小評価)、遠方の被写体が撮像素子の画素より小さい事(温度の過小評価)、赤熱した噴出物が露光時間内に画素外に移動する事(温度の過小評価)、等の影響を受ける。これらの問題の一部は複数波長の赤外線の解析により補正可能だが(Rothery, *et al.*, 1988)、一般的な熱赤外カメラは単一波長帯なので補正できない。さらに、専用機器が設置された火山は限られ、人工衛星の観測頻度も十分とは言えない。そのため、熱赤外線強度以外の遠隔測温方法を検討する事には、火山防災上の価値がある。

2. 原理と手法

高温の黒体が放射する電磁波の強度が最大となる波長は、温度の関数である(プランクの黒体放射、およびヴェーンの変位則)。温度 T (°K)の黒体の放射光のスペクトル $B(\lambda, T)$ (放射面の単位面積、単位立体角、単位波長当たりの輝度; $\text{Wm}^{-2}\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$) は、プランクの黒体放射(式1)から求まる。

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$

h はプランク定数、 k はボルツマン定数、 c は真空中における光の速度である。Fig. 1 は、(1) 黒体放射光の強度は温度とともに増加すること、(2) 可視成分のうち赤(長波長)に対する青(短波長)の相対強度すなわち色は温度とともに変化すること、そして、(3) マグマの温度(700~1200°C)では赤外成分が可視光より数桁強いこと、を示している。

黒体放射光の強度が温度とともに増加することを利用すれば、赤外線等の強度から温度が推定できる。但し火山岩は黒体(放射率=1)でないので、放射率の補正が必要となる。黒体放射光の色が温度とともに変化することを利用して、温度が推定できる。放射光の色を利用する温度測定法では、放射率の絶対値は大きな問題とならず、放射率が全波長にわたり均一であればよい。金属酸化物やレンガ表面の放射率は0.9以上で全波長にわたり

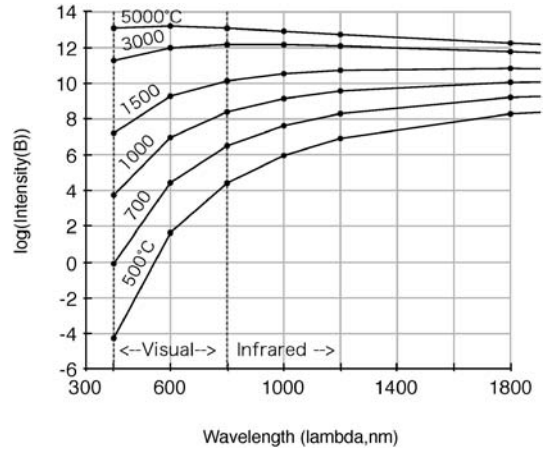


Fig. 1. The intensity of black-body radiation as a function of wavelength.

一定かつ方向性をもたないとされる(竹内, 1989)。本研究では火山岩を同様に扱い、黒体放射光の色にもとづく温度推定を試みる。

黒体放射の色の表現方法

火山監視カメラのデジタル画像は光の三原色の強度を示す数値の配列であり、光のスペクトル情報を含まない。黒体放射光とデジタル画像とを比較するため、 $B(\lambda, T)$ を等色関数(式2)により赤(X)・緑(Y)・青(Z)の刺激値に変換した。

$$\begin{aligned} X &= \int_{\lambda} f_X(\lambda) \cdot B(\lambda, T) d\lambda \\ Y &= \int_{\lambda} f_Y(\lambda) \cdot B(\lambda, T) d\lambda \\ Z &= \int_{\lambda} f_Z(\lambda) \cdot B(\lambda, T) d\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

等色関数 $f_X(\lambda)$, $f_Y(\lambda)$, $f_Z(\lambda)$ は、可視光線 λ の光がそれぞれ人間(標準観測者)の赤、緑、青の色覚に与える刺激の強さを定義する。本研究では視野角 2° の等色関数を可視光の波長範囲(360~830 nm)で積分し、X(赤)・Y(緑)・Z(青)の強度を得た。等色関数については Wyszecki and Stiles (1982) を参照されたい。更に式(3)の変換により、1976年にCIE(国際照明委員会; Commission internationale de l'éclairage)が勧告した $L^*a^*b^*$ 色空間の情報得られる(JIS Z 8729)。 $L^*a^*b^*$ 色空間は、 L^* 軸(明度)・ a^* 軸(緑⇄赤)・ b^* 軸(青⇄黄)が互いに直交するので、平面上に色情報を表示しやすい(Nakashima *et al.*, 1992)。

$$L^* = 116 \cdot g(Y/Y_r) - 16$$

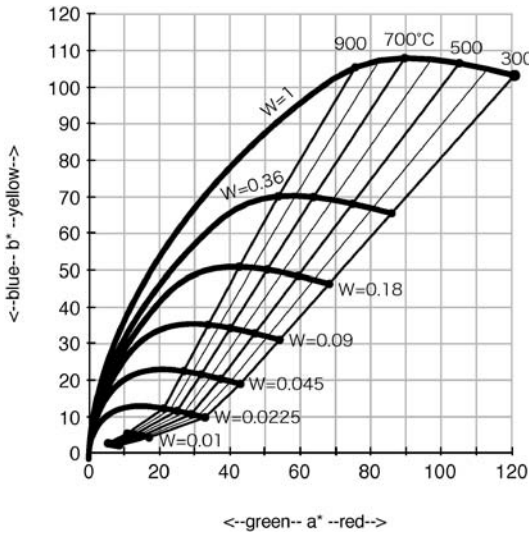


Fig. 2. The color of a black-body plotted on the a*-b* plane of the CIE L*a*b* color space. The color changes with the temperature of a black-body and the exposure (W = X+Y+Z) to radiation, where the parameter W is sum of stimulation indexes for red (X), green (Y), and blue (Z) colors normalized to that of 6500°K black-body radiation.

$$a^* = 500 \cdot \left[g\left(\frac{X}{X_r}\right) - g\left(\frac{Y}{Y_r}\right) \right] \quad (3)$$

$$b^* = 200 \cdot \left[g\left(\frac{Y}{Y_r}\right) - g\left(\frac{Z}{Z_r}\right) \right]$$

X_r, Y_r, Z_r は、白色光における X, Y, Z の値である。例えば X/X_r は、白色光（6500° K の黒体放射光）の中の赤色成分の強度によって規格化された、肉眼が感じる赤色の強さという意味である。 $g(X/X_r), g(Y/Y_r), g(Z/Z_r)$ は、それぞれ式 (4)の t に $X/X_r, Y/Y_r, Z/Z_r$ を代入して得られる値である。

$$\begin{cases} g(t) = \sqrt[3]{t} & t > (6/29)^3 \\ g(t) = \frac{1}{3} \left(\frac{29}{6}\right)^2 t + \frac{4}{29} & t \leq (6/29)^3 \end{cases} \quad (4)$$

なお、デジタル画像の画素の色は「Digital Color Meter. app」(Mac OSX)のようなソフトウェアを用いれば、L*a*b*色空間(CIE, 1976)のデータに変換できる。

黒体放射の色

a*-b*平面において、黒体放射光の色は (Fig. 2 の太線)、白色点として採用した 6500° K では原点 (白)であり、温度の低下とともに原点から離れる。Fig. 2 の複数の太線は、カメラの受光量 (W = X+Y+Z) が異なる場合の、黒体の色の温度変化を示す。画素の受光量は、露光

時間やレンズの集光力の違い、被写体の放射率 (<1)の違い、そして、被写体が画素より小さいことや、露出時間内に被写体が画素外に移動すること、等によって変化する。Fig. 2 の細線は、これら太線上の温度の等しい点を結んだ「黒体放射光の色の等温線」である。これらの等温線を用いれば、火山監視カメラが肉眼と同じ感受性で撮像する限りにおいて、赤熱岩塊の色から温度が読める。画素の受光量が変化しても温度が読めるという点において、赤熱岩塊の色を用いる温度測定手法は、一般的に遠隔測温に用いられる熱赤外カメラよりも有利である。

電子撮像装置の色と特性

本手法を電子撮像装置のデータに適用する際には、次のような点に注意する必要がある。火山監視カメラの映像では、不可逆的なデータ容量圧縮方式 (JPEG 等) が一般的に用いられる。JPEG 圧縮の場合、RGB 信号を色度差信号に変換する (輝度と色調に分ける) 際に色調の空間解像度を元画像の半分にする事と、8×8 個の画素グループ内の変化を示す数値を丸める際の誤差により、非可逆性が生じる。画像圧縮の影響を低減するには、圧縮率を低く (丸め誤差を小さく) とり、画像の変化が急激でない部位の色を測定すればよからう。

火山監視カメラが自動的にホワイトバランスを調整する場合には、白色の基準点が 6500° K の黒体放射から大きく離れる可能性がある。上に述べたように、 X_r, Y_r, Z_r は、白色光で規格化した X, Y, Z の値であるが、人間の目が白色光以外の光源に順応するという特性にあわせて、カメラ側も白色基準点を変更することがあるからである。白色基準点の問題は、監視カメラの運営者に対してカメラのホワイトバランスの固定を依頼することにより回避できると思われる。また、背景に標準光源 (星など) を写し込むことによっても、評価あるいは補正できると思われる。

3. 色調の観察結果

肉眼による高温岩石と赤外線 LED の色

暗闇の実験室内で 900° C 以上に加熱された玄武岩 (直径約 2 cm, 円柱状) を、およそ 3 分間で約 300° C まで自然冷却した。その間、試料表面を熱赤外カメラ (日本アビオニクス製, TVS620) で測温し、複数の電子撮像機器でも繰り返し撮影した。比較のため、二種類の赤外光源 (赤外線 LED; ピーク波長 870 nm と 940 nm) も撮影した。撮影条件を Table 1 に記す。詳細は宮城・前嶋 (2009) を参照されたい。

肉眼で観察した暗闇の高温岩石の色調は、700~800° C が黄色味をおびた赤色、600~700° C が暗い赤色、そして 500~550° C 以下が黒 (発光無し) である。比較のため肉

Table 1. Lower limits of the temperature of heated basalt photographable or perceptible in darkness.

Name of Devices	Temperature	Conditions
Naked Eyes	500-550°C	Looking carefully with 10 eyeballs
Mintron MTV-63V6HN	c.a. 360°C	Auto, Ultra high-sensitive mode
Nikon D40	c.a. 370°C	ISO 1600, F2.0, 50.0mm, 10 sec
Nikon D90	c.a. 490°C	ISO 1600, F13, 95.0mm, 20 sec
Canon EOS 5D Mark II	c.a. 400°C	ISO 1600, F2.0, 50.0mm, 15 sec
Canon EOS 5D Mark II	c.a. 370°C	ISO 25600, F2.0, 50.0mm, 15 sec
Canon EOS Kiss Digital N	c.a. 490°C	ISO 1600, F4.0, 35.0mm, 20 sec
Canon PowerShot SX10 IS	c.a. 500°C	ISO 800, F4.0, 35.6mm, 4 sec
Sony HDR-XR520	c.a. 390°C	Auto, Night mode
Sony HDR-XR520	c.a. 550°C	Auto, Normal mode

Modified after Miyagi and Maejima (2009).

眼で赤外線 LED を暗闇で観察すると、ピーク波長が 870 nm のものはごく僅かな赤色、950 nm のものは黒（発光無し）である。肉眼の光学的特性および観測者の感受性には個人差があると思われるが、少なくとも 5 人の観測者（赤司卓也・伊藤隆夫・坂井健・前嶋美紀・宮城磯治）の間では、高温岩石と赤外線 LED の見え方（見えたか否か、明暗、色あい）に関する意見は一致した。岩石の赤熱が認められなくなる温度を Table 1 に示す。

電子撮像装置による高温岩石と赤外線 LED の色

電子撮像機器で撮影された暗闇の高温岩石の色調は、肉眼とは明らかに異なり、かつ、撮影機材ごと異なった（宮城・前嶋，2009）。Nikon 製 D40 で撮影された高温岩石は、500~800°C の広い温度範囲で赤~ピンク色、500~400°C では赤色を呈し、約 370°C 以下では映らない。Nikon 製 D40 で撮影された約 400°C と 550°C の岩石の色調は、黒体放射の等温線には乗らず、 a^* 値が 0~50 の間に、 b^* 値が 0 付近に分布した（Fig. 3, D40_548°C, D40_380°C）。Nikon 製 D90 で撮影された高温岩石の b^* 値は、D40 よりも明らかに高い 80 付近に分布した（Fig. 3, D90_843°C）。比較のため D40 を用いて暗闇で撮影された赤外線 LED の色は、ピーク波長が 870 nm のものはハレーションが出るほどの強さの赤みがかった白色で、950 nm のものは暗い赤~ピンク色を呈した（宮城・前嶋，2009）。赤外線 LED の色調は、高温岩石の色調に類似した（Fig. 3, D40_LED）。このように、Nikon 製 D40 を用いて室内で撮影された高温岩石の色は、基本的に黒体放射の等温線に沿わないことが判った。

電子撮像装置による赤熱火山噴出物の色

まえちゃんねつとの浅間山監視用ネットワークカメラ（Nikon 製 D40 を使用；<http://bousai.maechan.net/> で公開）

による 2009 年 2 月 2 日午前 2 時頃の映像を解析した。カメラのホワイトバランスを確認するため、2 時 2 分の画像の背景に映っている星の色を測定した結果、Fig. 2 の $W = 1$ の時の黒体放射と調和的であることが判った（Fig. 3, 2:00_stars）。大半の星が原点付近に分布する事と、原点からやや離れた比較的低温な星の色（ $a^* = 5$, $b^* = 25$ ）でも約 4000°C を示す事から、この画像は太陽光を基準にしたと判断できた。

2 時 8 分の画像で雪に覆われた白い山腹を照らした赤い光は、 b^* 値が 20~30 で、300°C の黒体放射の等温線とほぼ平行に、より低温側に分布した（Fig. 3, 2:08_red_snow）。2 時 8 分に撮影された火口直上の赤熱部の色調は、 a^* - b^* 平面の原点付近の、黒体放射の等温線に沿って分布した（Fig. 3, 2:08_pink_vent）。2 時 2 分の画像の赤熱噴出物の色調は、 b^* 値が 40~60 で黒体放射の約 600°C の等温線に沿って分布した（Fig. 3, 2:00_red）。但し b^* 値が 40 以下で 600°C の等温線から a^* 値の増加する向きに 0~25 程度外れるものもある。このように、Nikon 製 D40 を用いた火山監視カメラの噴火映像に映った噴出物の色は、実験室内で行なわれた高温岩石撮影の結果とは違なり、黒体放射の等温線に沿わない場合と、沿う場合の両方が存在することが判った。

4. 考 察

赤外線の影響

もしも火山監視カメラが可視光のみを感じるならば、高温岩石の色は黒体放射の等温線（Fig. 2）に沿って分布し、温度が読めるはずである。撮像素子の電気信号を画像ファイルの数値に変換するプロセスの違いにかかわらず、電子撮像装置は人間の等色関数に合うように設計さ

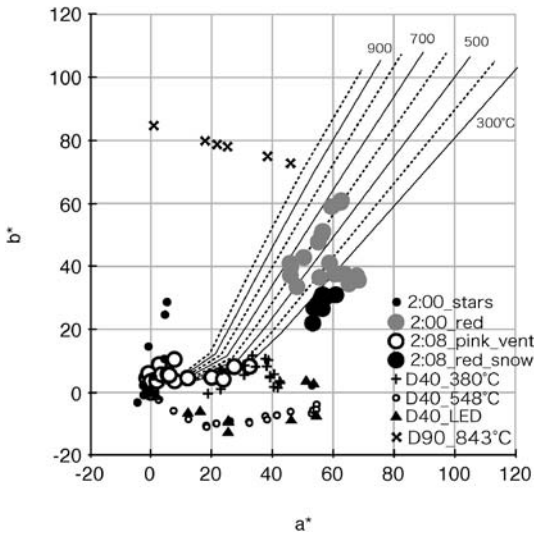


Fig. 3. The color of a heated basaltic rock, infrared LEDs, hot volcanic ejecta, and stars plotted on the a^* - b^* plane. Isotherm lines are the same as Fig. 2. Small black circle (2:00_stars): color of stars in the night sky in the photo taken at 2:00:36 2 Feb 2009 by a webcam (Digital Single Lens Reflex Camera; DSLR) “Kitakaruizawa network” technically supported by Maechan-net Ltd., (<http://bousai.maechan.net/>) at Asama volcano. Gray disc (2:00_red): color of red ejecta in the same photo. Black circle (2:08_pink_vent): color of glowing area over the vent in the photo taken at 2:08:36 2 Feb 2009 by a “webcam 2” DSLR of Maechan-net Ltd. Large solid circle (2:08_red_snow): color of red reflected light on snow surface near the vent in the same photo. Cross (D40_380°C): color of basalt surface heated at 380°C in darkness. Small solid circle (D40_548°C): color of basalt surface heated at 548°C in darkness. Small triangle (D40_LED): color of infra-red LED (Toshiba TNL227, peak wave length = 870 nm). Cross (D90_843°C): color of basalt surface heated at 843°C in darkness.

れるはずだからである（でなければ色映りを酷評され売れない）。ところが実験室で Nikon 製 D40 を用いて撮影された高温岩石の色の分布も、黒体放射の等温線に沿わない (Fig. 3)。赤外光源 (LED) の色が高温岩石と同様に a^* 値が増加する向きに分布することから、高温岩石の色が等温線に沿わない原因は、電子撮像機器が赤外光を感知する為だと考えられる。電子撮影機器には赤外線遮断フィルターが挿入されているが、漏れはあるだろう。画像の輝度とともに色調が赤、ピンク、白へ変化することは、感光素子とレンズの間に挿入されている複数の分光フィルターのうちより長波長の赤用が、より多くの赤外

線を透過させることを示す。暗闇で赤熱岩石が映る温度の下限が機種毎に異なることは、赤外線に対する感度が機種毎に異なることを示す (Table 1 参照)。このように赤外線の影響は赤熱岩石の色を用いる温度推定法にとって致命的となり得るが、Nikon 製 D40 を用いる火山監視カメラが撮影した噴出物の色の一部が黒体放射の等温線 (約 600°C) に沿うという事実は、火山監視カメラの撮影状況によっては赤外線の影響が小さくなることを示唆している。

浅間山の噴火映像の解釈

2009年2月2日午前2時8分の火口直上の赤熱部の、原点付近の黒体放射の等温線に沿って分布する色調は (Fig. 3, 2:08_pink_vent)、輝度が高いために光の飽和によって原点付近に分布したと解釈される。2時8分の画像で雪に覆われた白い山腹を照らした赤い光は、300°Cの黒体放射の等温線とほぼ平行に、より低温側に分布するが (Fig. 3, 2:08_red_snow)、Nikon 製 D40 に 370°C 以下の岩石が映らない (宮城・前嶋, 2009) ことから、噴出物の温度が 370°C を越えていた事はほぼ確実である。300°Cの黒体放射の等温線に沿った分布は、より高温物体の黒体放射光の色に、赤外線の影響による a^* 値が増加した為と解釈するのが自然だろう。

2時2分の画像の赤熱噴出物の色調は、 b^* 値が 40~60 で黒体放射の約 600°C の等温線に沿って分布した (Fig. 3, 2:00_red; 但し b^* 値が 40 以下で 600°C の等温線から a^* 値の増加する向きに 0~25 程度外れるものもある)。Nikon 製 D40 で撮影した赤熱岩石の色が黒体放射の等温線に乗らないことが室内実験から明らかであるにもかかわらず、噴出物の色調が 600°C の黒体放射の等温線に沿う理由は、以下のように考えられる。噴火の撮影では、被写体とカメラの間に厚い大気と濃厚な噴煙がある。赤外線と可視光とでは散乱や透過の特性が異なるから、噴煙等の状況次第で、高温噴出物から放射された赤外光と可視光は、どちらかが相対的に増加あるいは減衰して観察される可能性がある。Nikon 製 D40 は赤外線を赤色として感受するので、赤外線が卓越する場合には噴出物の色は Fig. 2 の等温線の右側にずれ、これが Fig. 3, 2:00_red のうち、 b^* 値が 40 以下で 600°C の等温線から a^* 値の増加する向きに 0~25 程度外れるものに対応すると考えられる。逆に可視光が卓越する場合には噴出物の色は等温線に沿い、これが 600°C の等温線に沿うものに対応したのだと考えられる (赤外線の影響が加わるので 600°C は最低見積り)。今回は噴煙による偶発的な赤外線の減衰に助けられたが、将来的には、高性能の赤外線フィルターの採用や、赤外線の感受性が異なる複数のカメラを用いた同時観測によって、より確実に赤外線を低減あ

るいは補正できる可能性がある。

火山監視カメラの色調が示した温度 (> 600°C) は、噴出物の結晶度が高いという観察事実と調和的である。2009年2月2日の噴火による火山灰試料(火口の南南東約7.5kmの浅間台で採取; 試料番号090203)の約8割を、新鮮な破断面をもち、発泡度が低く、変質が認められず、石基の結晶度が高い粒子群(グループG)が占める。監視カメラが捉えた赤熱岩塊は、噴出物の大半を占めるグループGと同じ物だと考えられる。このマグマの全岩化学組成が浅間山の2004年9月噴出物(三宅・他, 2005)と同じと仮定してMELTS(Ghiorso and Sack, 1995)で解析をすると、地表付近におけるメルト分率は600~700°Cの場合に5wt.%以下である事が示された(Miyagi, 2010)。

5. まとめ

高温岩石の撮影実験と黒体放射の理論的検討にもとづき、夜間の火山監視カメラの画像を解釈する際の注意点を把握した(赤外線, ホワイトバランス, 画像劣化)。そのうえで、火山監視カメラで撮影された赤熱岩塊の色調にもとづく、噴出物の温度見積りを試みた。浅間山2009年2月2日未明にまえちゃんねつの火山監視カメラ(Nikon製D40)が撮影した映像は、赤熱岩塊の温度が1000°C以上である印象を与えるが、D40を用いた高温岩石の撮影実験結果は、この温度見積りが赤外線の影響による過大評価である事と、当該噴火の赤熱岩塊の温度が少なくとも370°C以上である事を示した。更に、監視カメラの赤熱岩塊の色と黒体放射の色を比較した結果、噴火映像には赤外線の影響が少ない部分が存在する事がわかった。その色調から赤熱岩塊の温度は約600°Cと見積られ、岩石学的な見積り(600~700°C)と調和した。赤熱岩塊の色を用いる温度測定方法の信頼性を改善するには、赤熱岩塊の赤外線が部分的に減衰した理由の究明と、赤外線の影響を低減させる観測上の工夫(高性能の赤外線フィルターを採用や、複数のデジタルカメラを用いた同時観測)が有効と思われる。

謝 辞

日本火山の会の赤司卓也氏、伊藤隆夫氏、坂井健氏は、それぞれキャノン製Power Shot SX10 IS、ソニー製HDR-XR520、ニコン製D90による赤熱岩石の画像を提供した。日本火山の会の大澤晶氏は電子撮像素子の近赤外領域の感度特性に関する知見を与えた。気象研究所の鬼澤真也氏は2009年2月の火山灰試料を提供した。産業技術総合研究所の伊藤順一氏は可視光用のデジタルカメラで温度を見積る可能性に関するヒントを与えた。グエン・ホアン氏は英文原稿を添削した。松島喜雄氏と風早

康平氏はそれぞれ温度測定用の熱赤外カメラと三脚を貸与した。編集委員の渡辺了氏および二名の匿名査読者による数多くの建設的な意見は、初稿の不備を大幅に改善した。以上の方々に感謝いたします。

引用文献

- Furukawa, Y. (2010) Infrared thermography of the fumarole area in the active crater of the Aso volcano, Japan, using a consumer digital camera. *J. Asian Earth Sci.*, **38**, 283-288.
- Ghiorso, M. S. and Sack, R. O. (1995) Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **119**, 197-212.
- 前嶋美紀・早川由紀夫・田中千尋・村井佳彦 (2005) 山麓に設置したウェブカメラによる浅間山監視システム。火山, **50**, 411-416.
- 宮城磯治・前嶋美紀 (2009) 電子撮像素子で撮影された高温岩石の画像。地質調査総合センター研究資料集 no.500.
- Miyagi (2010) Contour maps of some useful petrological parameters on P-T plane: A case of the eruptive products of the Asama volcano on 1 September 2004. *Open File Report of GSJ, no.531*, Geological Survey of Japan, AIST.
- 三宅康幸, 高橋 康, 津金達郎, 牧野州明, 角前寿一, 西来邦章, 福井喬士, 信州大学浅間火山04年噴火調査グループ (2005) 浅間火山2004年9月噴火の本質噴出物について。火山, **50**, 333-346.
- Nakashima, S., Miyagi, I., Nakata, E., Sasaki, H., Nittono, S., Hirano, T., Sato, T., and Hayashi, H. (1992) Color measurement of some natural and synthetic minerals - I. *Rep. Res. Inst. Natural Resources, Mining College, Akita Univ. No. 57*, 57-76.
- Rothery, D.A., Francis, P.W. and Wood, C.A. (1988) Volcano Monitoring Using Short Wavelength Infrared Data from Satellites. *J. Geophys. Res.*, **93**: 7993-8008.
- Saito, T., Sakai, S., Iizawa, I., Suda, E., Umetani, K., Kaneko, K., Furukawa, Y. and Ohkura, T. (2005) A new technique of radiation thermometry using a consumer digital camcorder: Observations of red glow at Aso volcano, Japan. *Earth Planets Space*, **57**, e5-e8.
- 竹内正雄 (1989) 熱計算入門 II - 伝熱・流体の流れ -。省エネルギーセンター, 73-76.
- 寺田曉彦, 中川光弘, 大島弘光, 青山 裕, 神山裕幸 (2004) 2003年十勝沖地震(MJMA 8.0)発生直後に樽前火山で起きた高感度カメラで明るく見える現象。地震研究所彙報, **79**, 77-26.
- 浦井 稔・福井敬一・山口 靖・Pieri, David C. (1999) ASTERによる火山観測の可能性とグローバル火山観測計画, 火山, **44**, 131-141.
- Wyszecki, G. and Stiles, W.S. (1982) Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae. John Wiley & Sons, New York, 117-248.

(編集担当 渡辺 了)