

一般用デジタルカメラを利用した簡易SO₂カメラの製作

橋本武志*・寺田暁彦**・江尻 省***・中村卓司****・阿保 真*****

(2012年4月27日受付, 2012年9月25日受理)

A low-cost SO₂ Imager with the Use of Digital Cameras of Consumer UseTakeshi HASHIMOTO*, Akihiko TERADA**, Mitsumu EJIRI****,
Takuji NAKAMURA*** and Makoto ABO*****

We produced an SO₂ imager of a low-cost version with the use of digital cameras of consumer use. General configuration and characteristics of the instrument are presented. Calibration with SO₂ cells of known column concentration confirmed a comparable absorption coefficient to the device which is previously invented by Mori and Burton (2006). Although simultaneous shooting with two cameras is necessary to overcome the temporal change of an object because of somewhat long exposure time (5 to 10 sec) required, this device operates without external power or control PCs, and thus, is suitable for mobile use. We performed a field test of the instrument at Sakurajima volcano and confirmed its validity as an SO₂ imager. However, further improvement of the optical system or a special care with UV scattering in front of a plume is necessary for quantitative applications in a field operation.

Key words: SO₂ camera, discharge rate, plume, Sakurajima volcano

1. はじめに

火山噴煙に含まれるSO₂は、白色噴煙や有色噴煙として認識されるH₂Oや火山灰と異なり、視認することが難しい。SO₂を簡便に可視化できれば、火山活動の監視や活動評価の指標として有用である。また、その測定に定量性や高時間分解能が付加されれば、噴火準備過程や爆発機構の研究にも大いに貢献できる。

近年、火山ガスの遠隔SO₂測定は、従来型の相関スペクトロメータ(COSPEC)に代わって、DOAS(Differential Optical Absorption Spectroscopy)と呼ばれる手法を用いた単視線の紫外分光装置(例えば、Galle *et al.*, 2003; McGonigle *et al.*, 2002)による、バニングもしくはトラバース測定が一般的となっている。これとは別に、いわゆるSO₂カメラと呼ばれる、CCDカメラと紫外域バンド

パスフィルタを組み合わせてSO₂濃度分布を画像として得る装置も開発されている(例えば、Mori and Burton, 2006)。この手法の最大の特長は、いうまでもなくSO₂ガスを画像として視認できることである。COSPECやDOASのような単視線の測定では、特に濃度の低い状況において背景レベルとの区別が難しいケースがある。これに対して、画像で濃度分布のスナップショットが得られるSO₂カメラの場合には、パターン認識によって背景との分離は容易となる。また、測定原理は単純で、特殊な解析技術を必要としない。このような特長を有するSO₂カメラは、脱ガス機構を含めた基礎研究から、火山活動のモニタリングに至るまで幅広く応用できるであろう。しかし、高性能の計測用CCDを用いた装置は高価であり、一般の火山研究者や行政機関が手軽に入手でき

*〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目
北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

**〒377-1711 群馬県吾妻郡草津町草津 641-36
東京工業大学火山流体研究センター

Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

***〒190-8518 東京都立川市緑町10-3
国立極地研究所

National Institute of Polar Research

****〒191-0065 東京都日野市旭が丘6-6

首都大学東京システムデザイン研究科

Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University

Corresponding author: Takeshi Hashimoto
e-mail: hasimoto@mail.sci.hokudai.ac.jp

るものとは言い難い。そこで、著者らは、安価に入手可能な一般用のデジタルカメラを利用して簡易型の SO₂カメラを製作した。後述のように、測定時間分解能や野外測定における定量性にはまだ問題が残されているものの、本装置は誰にでも容易に製作できるうえ、火山噴気に含まれる SO₂を可視化するために十分な性能を有している。本稿では、その構成と基本性能について、観測例を示しつつ報告する。

2. 装置の基本構成

本研究で製作した装置の基本構成と装置の外観を Fig. 1 に示す。本研究では、受光装置として一般撮影用のデジタル CCD カメラ (Nikon D70) を使用した。撮影は通常の写真撮影と同様に行い、画像は各カメラの内蔵メモリに保存される。このため、外部電源や制御用 PC などの特別な仕組みは不要で、可搬性・軽量性に優れている。

CCD 素子の大きさは 23.7×15.6 mm であり、総画素数は 6.24 メガピクセル、輝度分解能は 12 bit である。一般に、CCD 素子は紫外域から近赤外域までの幅広い分光感度特性を有する。そのため、可視領域を撮影対象とする一般のデジタルカメラには、モアレ防止等を目的とした光学式ローパスフィルタが装着されている場合があり、紫外線を受光するためにはこれを除去しなければならない。また、通常の写真撮影に用いられるレンズは紫外線を十分に透過しないため、本研究では、石英ガラスで作られた紫外線撮影用のレンズ Nikon UV-105 mm (F 4.5) を使用した。波長 220–900 nm における透過率は公称値で 70% である。

CCD が感度を有する波長帯のうち、本研究では SO₂ の吸収帯に相当する 310 nm と、非吸収帯に相当する 330 nm を使用する。これらは、バンドパスフィルタを用いて抽出することができる。本研究では、朝日分光製の狭帯域バンドパスフィルタ (BPF1: 半値全幅約 9 nm, 透過率 65%, 阻止率 10⁻⁵) に加えて、このフィルタで阻止しきれない近赤外域の漏れ込みをカットするために、やや広めの紫外通過バンドパスフィルタ 2 種 (BPF2: 朝日分光製, 中心波長 320 nm, 半値全幅 220 nm, 透過率約 98%, BPF3: 朝日分光製 RR340, 中心波長 340 nm, 半値全幅約 80 nm, 透過率約 80%) を併用した。

310 nm 帯と 330 nm 帯では、CCD の感度や太陽光の強度が異なる。この影響を考慮せずに撮影を行うと、いずれかの画像が CCD のダイナミックレンジを超えて露出不適正となってしまうが、開口絞りを変えると光学系の幾何学的特性に影響を与える可能性があるため不都合である。そこで、本研究では、330 nm 帯の光学系に ND8 フィルタを 2 枚追加して光量を約 100 分の 1 に落とし、

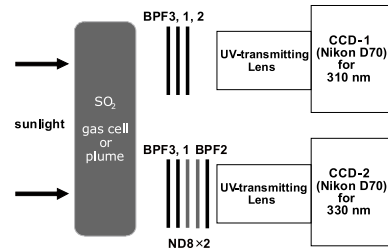


Fig. 1. (Top) Basic configuration of the SO₂ camera developed in the present study. (Bottom) SO₂ camera in field operation. Two CCDs are mounted alongside on a tripod.

両波長帯でほぼ同程度の背景輝度を得ることとした。上記の構成において、自然散乱光を光源とした場合の適正な露出時間は 5~10 秒程度であり、2 つの波長帯を 1 台のカメラで交互に測定しようとすると撮影対象の時間変化が無視できなくなる。これを避けるため、2 台のカメラを用いて 310 nm 帯と 330 nm 帯を同時に、同じ露出時間で撮影する方式を採用した。この方式は既に Kantzas *et al.* (2010) や Kazahaya *et al.* (2011) でも用いられている。得られた 2 枚 1 組の画像 (正確には、両波長帯それぞれの背景画像を含めて 4 枚) から SO₂ 濃度を抽出するには、次章で説明する一連の演算を PC 上で後処理する。なお、本研究で用いたカメラでは、CCD 素子に固有のダークノイズの減算処理は、撮影時に自動で行う機能を有している。

本論文で記述した光学系の構成では、量産品ではない UV レンズの価格が全体のコストを決めている。ただし、画像の歪みや収差の面で妥協するならば、透過率の高い石英製の単レンズに光学系を変更することで、極端な低コスト構成とすることも可能である。

3. 輝度-SO₂カラム濃度特性の実測試験

撮影される画像の輝度情報からは、SO₂ のカラム濃度、すなわち視線方向に積分された濃度が得られる。まず、その原理について説明する。SO₂ による紫外線吸収が Lambert-Beer の法則に従うとすると、入射光と透過光の強度比は以下の式で表すことができる。

$$I(\lambda)/I_0(\lambda) = \exp[-\varepsilon(\lambda)cd] \quad (1)$$

ここで、 I_0 は入射光の強度、 c はSO₂の濃度、 d はガスの厚みである。 ε は吸光係数で、ガス種に固有の定数であるが、波長依存性をもつため $\varepsilon(\lambda)$ と表記した。両辺の自然対数を取り符号を反転すると、吸光度 A が得られる。

$$A = -\ln [I(\lambda)/I_0(\lambda)] = \varepsilon(\lambda)cd \quad (2)$$

吸光度は、吸収減光がない場合（すなわち $I = I_0$ の場合）にゼロであり、ガス濃度と厚みの積、すなわちカラム濃度 C_{col} に比例する。これより、カラム濃度は、以下の式で与えられる。

$$c_{col} \equiv cd = A/\varepsilon_{eff} \quad (3)$$

実際には、複数の吸収波長を含む有限の幅をもった波長帯で測定を行うため、実効的な ε の値（以下、実効吸光係数と呼ぶ）はフィルタ等の光学系に依存する。そこで、(3)式では、 ε の代わりに ε_{eff} と表記した。機器毎に予めこの実効吸光係数を実測しておく必要がある。本研究では、カラム濃度既知の複数のSO₂ガスセルに晴天時の自然散乱光を透過させ、後述の(4)式で定義される見掛け吸光度を測定した。カラム濃度に対する見掛け吸光度のプロットをFig. 2に示す。その傾きから ε_{eff} が得られる。以下、この校正実験について詳述する。

ガスセルの厚みは10mmで、カラム濃度は90, 192, 497, および1011ppmmの4種を用いた。Fig. 1に示したように、この校正実験ではレンズの前にガスセルを置き、ガスセルの窓が画角の中心付近になるようにカメラを固定する。光源強度の時間変化を避けるため、4種のガスセルの置き換えは数分間で完了するように撮影を行った。参考までに、ガスセルとバンドパスフィルタ、およびND8フィルタの波長透過特性をFig. 3に示す。

一連の校正撮影後に画像をPCに取り込み、セルの窓部分の輝度を読み取る。本研究で用いたカメラの場合、ひとつの画素についてRGBの3つの素子があり、三原色分解するためにそれぞれにカラーフィルタが施されている。このカラーフィルタは、可視光を透過するものであるが、紫外域にも漏れ特性がある。実験の結果、紫外光に感度のあるのは、RGBのうちRチャンネルのみで、GチャンネルおよびBチャンネルには殆ど有効な感度がないことが確認された。このため、以下に示す輝度とは、すべてRチャンネルについてのものである。

画像上のピクセル毎の見掛け吸光度を、(2)式を拡張した次式により定義する。

$$A_a(i,j) = -\ln \left(\frac{P(i,j)_{310s}/P(i,j)_{310bg}}{P(i,j)_{330s}/P(i,j)_{330bg}} \right) + ofs \quad (4)$$

ここで、 $P(i,j)$ は測定画像上のあるピクセルにおける生の輝度値を表し、添字の数字部分は、310nmまたは330nmの画像であることを示す。また、添字のsはSO₂ガスを透過してきた測定対象（この実験ではガスセルの窓部分）の画像であることを表し、bgは、ガスセルを除去した状態で背景散乱光だけを撮影した画像であることを表している。なお、これはMori and Burton (2006)の見掛け吸光度と同じ定義である。右辺第1項の分母と分子は、それぞれ330nmと310nm帯における背景輝度を基準とした輝度比を表している。それぞれの背景画像(bg)で除算しているのは、主にレンズの周辺減光を除去することを目的とした処理であり、原理上は必須ではない。

(2)式からわかるように、カラム濃度と吸光度の間には線形関係がある。4種のガスセルのカラム濃度に対して、セルの窓部分の輝度を平均処理して(4)式の右辺第1項を求めてプロットし、直線近似したときの傾きが(3)式の実効吸光係数 ε_{eff} である。ただし、生の輝度画像には、ガスセルのガラスによる減光が含まれている。ガスセルの窓部分の輝度とbg画像の輝度を、SO₂の吸収がない330nm帯と比較することにより、ガラスによる減光が10~12%であることが確認できたので、実効吸光係数の計算には、これを補正した輝度値を用いた。なお、Fig. 3に示したガスセルの透過特性グラフでは、カラム濃度によらず長波長側で約15%の減光が認められるが、これには、ガスセルのガラスによる減光に加え、セルの窓が分光光度計の光源光路径よりもやや小さかったことによる影響が含まれている。右辺第2項のオフセット(ofs)値は、上記近似直線のy切片に対応するもので、カラム濃度が0のときに $A_a = 0$ となるように決定した。(4)式の定義より、オフセット値は理論上ゼロになるべきものであるが、実際の値は-0.02程度である。なお、実際のフィールド測定では、上記特性試験で得た実効吸光係数を用いるが、オフセット値については、特性試験の値を参考にしながら、噴気から離れた方向のカラム濃度値がゼロになるよう試行錯誤的に調整している。Fig. 2では、この ofs 値を加味した吸光度 A_a を示しており、実効吸光係数は約 $1.5 \times 10^{-4} \text{ppmm}^{-1}$ であった。

この結果から、輝度1ビットの変化に対応するカラム濃度値の分解能を計算することができる。カラム濃度分解能は、背景輝度をどのレベルに設定するかにも依存し、かつ、どの輝度範囲を対象としているかによっても変化する。また、カラム濃度が低い部分ほど分解能が高い。階調8ビットのJPEGフォーマットを用い背景輝度を200

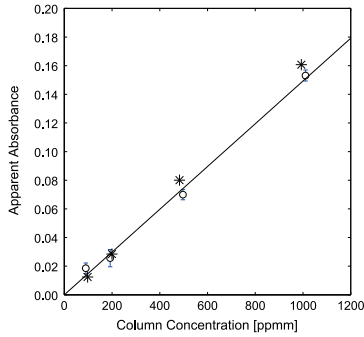


Fig. 2. Apparent absorbance with respect to the column concentration of calibration cells. Error range indicates 1σ of 100×100 pixels. Asterisks indicate the values from Mori and Burton (2006).

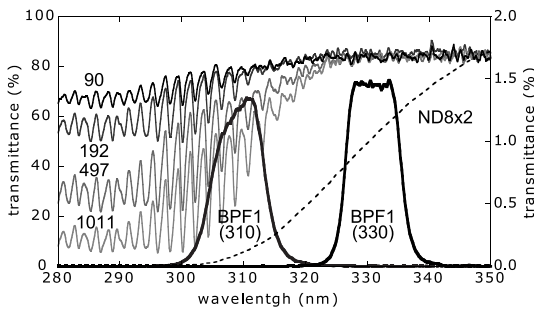


Fig. 3. Spectral transmission characteristics of the two band-pass filters (BPF1 for 310 nm and 330 nm) and of the calibration cells with known column concentrations (90, 192, 497, 1011 ppmm). These are shown as solid lines with the scale at left-hand side. Transmittance of the ND8 filter (two-ply) is also shown as a broken line with the scale at right-hand side.

とした場合では、理論上、輝度 200 付近で 34 ppmm/bit、輝度 100 付近で 67 ppmm/bit である。CCD のノイズがあるために、実際上の分解能はこれよりも悪化するが、画像の平滑化処理を行うと、実用上問題のない程度まで改善される (Fig. 2 の誤差範囲は、 100×100 ピクセルあたりの標準偏差 $\pm 1\sigma$ で表現している)。なお、周辺減光を問題にしない場合には、(4)式で背景画像による除算を行わない方が、ノイズはより押さえられる。Fig. 2 には、Mori and Burton (2006) の装置特性も併せて示したが、本研究で製作した装置は、実効吸光係数では彼らのものとはほぼ同程度であることがわかる。

ところで、実測された校正用セルの吸収特性とバンドパスフィルタの透過特性 (Fig. 3) にもとづいて、310 nm 帯で期待される実効吸光係数を計算すると、実測値の約

4 倍である $6.1 \times 10^{-4} \text{ ppmm}^{-1}$ が得られる。実測値と理論値がこのように大きく食い違っているのは、CCD の波長感度特性がバンドパスフィルタの帯域幅の中で平坦ではないことによる可能性が高い。一般に CCD の感度特性は短波長側で急激に低下する一方、 SO_2 による吸収は短波長側で強くなる。このため、CCD の感度特性を含んだ実際の総合特性では実効吸光係数が理論値よりも小さくなっているものと考えられる。

4. 野外動作試験

次に著者らは、本研究で製作した SO_2 カメラの野外性能を確認するために、実際の火山噴気を対象とした動作試験を行った。野外試験の対象として、ほぼ安定して多量の SO_2 ガスが放出されている桜島火山の昭和火口を選定した。2011 年 3 月 31 日の午前 10 時から 12 時にかけての約 2 時間、昭和火口から南南西約 3 km の位置にある古里運動公園において分光撮影を行った。この位置からは、昭和火口を直視することはできないが、火口から 100 m 程度上昇したところから、稜線を越えて噴気が視認できる位置関係にある。当日は快晴で、北西の弱い風が吹いていた (鹿児島地方気象台における風向風速は北東 2~3 m/s、湿度 46%、気温 14~16°C)。適な条件で分光撮影を行ったのは 11 時 30 分~12 時 00 分の約 30 分間である。レンズ絞りは開放、露出時間は 8 秒間とし、撮影は 1 分間隔で行った。一連の噴気撮影の最初と最後に背景画像 $P(i,j)_{310bg}$ 、 $P(i,j)_{330bg}$ を取得した。背景画像としては、火口方向から仰角を変えずにカメラを水平回転させ、噴気のない方向の青空を撮影した。

なお、撮影時間帯において昭和火口で爆発は発生しなかった。火口から立ち上る噴気は透明度の高い白色であり、目視で判断する限り、火山灰の混入しない状態でほぼ連続的に放出されていた。測定時間中、噴気の流れる方向や速度には殆ど変化が見られなかったが、噴気水蒸気の濃さには若干の揺らぎが繰り返されていた。

11 時 35 分のデータを Fig. 4 に例示する。まず、2 枚の紫外画像を比較すると、310 nm 帯にのみ、 SO_2 の吸収による有意な減光があることが視認できる。310 nm と 330 nm の 2 枚の画像 (それぞれの背景画像を含めると計 4 枚) から、(4)式によってピクセル毎の見掛け吸光度 A_a を求め、校正実験 (Fig. 2) から得られた実効吸光係数 ϵ_{eff} の値を用いて、(3)式によりカラム濃度に変換する。

2 台のカメラの画角には僅かにずれがあるため、前処理として片方の画像に回転と平行移動を施す。また、カラム濃度値はピクセル毎のばらつきが大きいため、ここでは、 5×5 ピクセルの平滑化処理を行う。得られたカラム濃度画像 (Fig. 4 右下) を見ると、噴気には 300~600

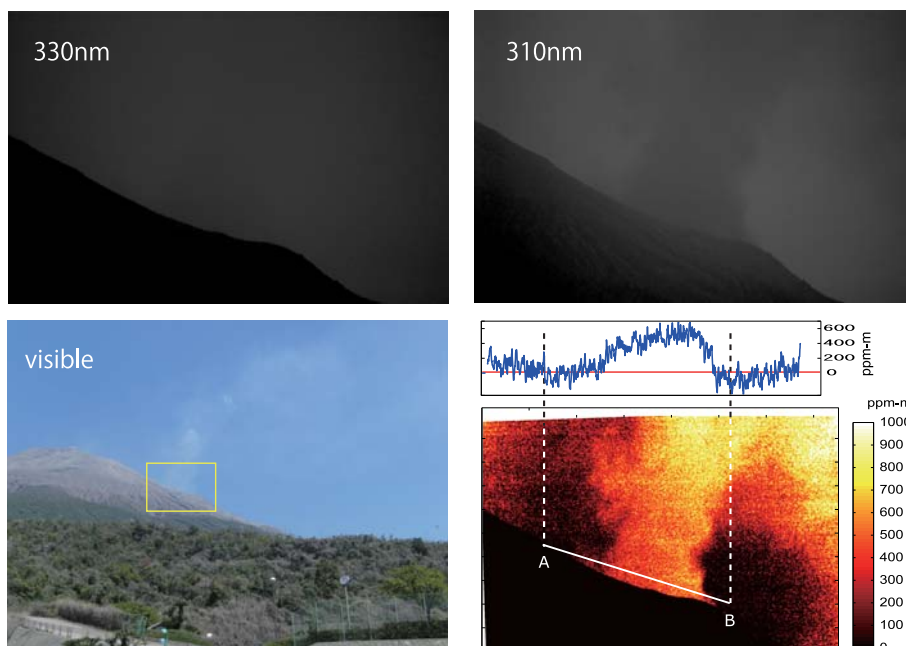


Fig. 4. An example of spectral images of a plume from Showa crater at Sakurajima volcano viewed from Furusato athletic park (c.a. 3 km SSW from the crater). Upper-left : 330 nm band; Upper-right : 310 nm band. Lower-left panel shows the visible image at the same time (11h35 m JST). Yellow inset corresponds to the frame of the upper panels. Lower-right shows the column concentration image produced from the upper images with a column concentration profile along the line AB.

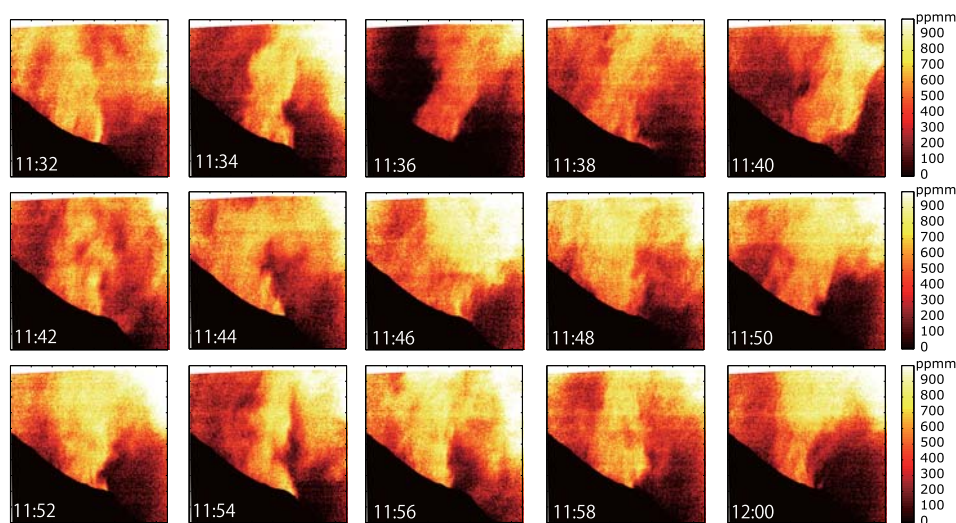


Fig. 5. Column concentration snapshots of the plume from Showa crater on March 31, 2011 from 11 : 32 to 12 : 00 JST. Each picture frame is the same as the right-bottom panel of Fig. 4 but reduced in 90% widthwise for saving the space.

ppmm 程度の SO₂ガスが含まれているのがわかる。濃度の高い部分が、昭和火口から画面の右上方向に向かって伸びていることが明瞭に認識できる。これにより、本研

究の装置が火山噴気 SO₂の可視化カメラとして機能していることがわかる。

次に SO₂の放出率を以下の手順で見積もり、定量性に

ついて検討する。まず、Fig. 4 右下図において、噴気にはほぼ直交する直線 AB に沿ってカラム濃度を積分する(5式)。ここでは、AB の距離は、噴気の幅や中心軸が時間とともに変化することを考慮して、視認できる噴気の幅よりも広く設定している。直線 AB は、火口の直上を通りかつ視線方向に対して直交する位置に置き、その実距離は、レンズの画角と火口までの距離に基づいて算出する。 Δl は、直線 AB に沿った画像上の 1 ピクセルあたりの実距離である。

$$C \equiv \sum_A^B c_{col}(i,j) \Delta l \quad (5)$$

さらに、カラム濃度画像から SO_2 放出率への変換は、次の計算式を用いる。

$$\Phi_{\text{SO}_2} = \frac{CuM}{f} \quad (6)$$

M は SO_2 のモル質量、 f は気体のモル体積で、ここではそれぞれ 0.064 [kg/mol]、 0.0224 [m³/mol] とする。 u は噴気の上昇速度である。上昇速度は、連続写真から噴気の特徴的な部分を追跡することにより $10\sim 15$ m/s と見積もった。

上記の方法によって得た 2 分毎のカラム濃度画像を Fig. 5 に示す。濃度の高い部分が画面の中央部に集中して柱状に見える時間帯と、周辺部にも拡散して見える時間帯があることがわかる。おそらく、後者の場合は噴気の上昇力が弱い状態で、ガスが滞留しがちになるために、濃度分布としてはやや高くなり、噴気の幅も広がったように見えているものと考えられる。現有のデータでは、画像毎に上昇速度を精度良く求めることが困難であったので、本研究では上昇速度は上記 $10\sim 15$ m/s の中央値で固定し、誤差範囲を ± 2.5 m/s として画像毎の放出率に換算した (Fig. 6)。

その結果、この時間帯における放出率は、 3.4 ± 0.7 kg/s と求められた。これを 1 日あたりの放出率に換算すると、 300 ± 59 t/d となる。気象庁の測定によれば、2011 年 3 月の SO_2 放出率として $700\sim 1,700$ t/d の値が報告されている (気象庁, 2011)。気象庁の報告値は、桜島南岳火口と昭和火口からの放出率を分離して測定したのではなく、両者の和に相当するのに対して、本研究の測定は昭和火口からの放出率のみを測定している。また、本研究の測定は非爆発時に行われたために SO_2 放出率が低かった可能性があることに加えて、測定距離が約 3 km と長いこと、Mori *et al.* (2006) が指摘したように、噴気より手前の大気による紫外線散乱の効果が 310 nm 帯に強く表れ、カラム濃度推定値が過小評価されている可能性が高い。これらのことを考慮すると、本研究の測定値が気象庁の報告値の約 $20\sim 40\%$ と小さいことは定性的

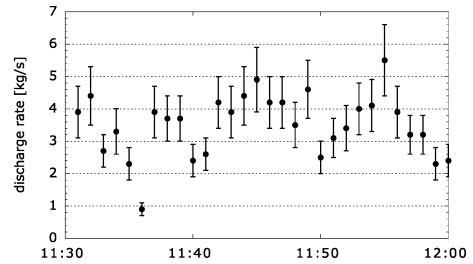


Fig. 6. Discharge rate of SO_2 gas obtained from the snapshots shown in Fig. 5. Ascent velocity is assumed to be $10\sim 15$ m/s. Error range corresponds to that of the ascent velocity.

に理解できる。本研究の装置で測定器としての定量性を確保するには、散乱の影響が小さい波長帯に光学系を変更するか、Kazahaya *et al.* (2011) が行っているように DOAS との同時観測を併用して距離減衰の補正を施すなどの工夫が必要であろう。

5. まとめ

著者らは、一般用のデジタルカメラを利用して比較的 low cost の SO_2 カメラを製作した。本装置は誰にでも容易に製作できるうえ、火山噴気に含まれる SO_2 を可視化するために十分な性能を有している。また、光学系の選択によっては、さらに low cost の構成も実現可能であり、基礎研究以外への応用可能性も秘めている。

この装置について、濃度既知のガスセルを用いた校正実験を行ったところ、Mori and Burton (2006) の装置とほぼ同程度の実効吸光係数が得られた。著者らは、この装置を用いて 2011 年 3 月 31 日に桜島で野外動作試験を行い、実際の火山噴気を対象とした SO_2 可視化装置としての有効性を確認した。一方で、定量性を確保するためには、噴気手前側の紫外線散乱の影響が小さい波長帯に光学系を変更するか、DOAS 等との同時観測を併用し、カラム濃度値の距離依存性を適宜補正するなどの工夫が必要であることが確認された。

謝 辞

校正用のガスセルは、京都大学地球熱学研究施設火山研究センターよりお借りしました。対応いただいた吉川慎氏に感謝いたします。ガスセルおよびバンドパスフィルタの透過特性測定には、国立極地研究所の光学実験室を利用しました。北海道大学電子科学研究所の竹内繁樹氏には、ND フィルタの透過特性測定にご協力いただいたほか、研究全般にわたって重要な助言をいただきました。八神 樹氏には、桜島でのフィールド測定の補助を

していただきました。森 俊哉氏と風早康平氏には、注意深い査読と建設的な助言をいただきました。両者の査読により本稿は大幅に改善されました。なお、本研究は、科学研究費基盤研究 (B) 21340122 による支援を受けました。

引用文献

- Galle, B., Oppenheimer, C., Geyer, A., McGonigle, A.J.S., Edmonds, M. and Horrocks, L. (2003) A miniaturised ultraviolet spectrometer for remote sensing of SO₂ fluxes: a new tool for volcano surveillance. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **119**, 241–254.
- Kantzas, E. P., McGonigle, A.J.S., Tamburello, G., Aiuppa, A. and Bryant, R. G. (2010) Protocols for UV camera volcanic SO₂ measurements. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **194**, 55–60.
- Kazahaya, R., Mori, T., Takeo, M., Ohminato, T., Urabe, T. and Maeda, Y. (2011) Relation between single very-long-period pulses and volcanic gas emissions at Mt. Asama, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L11307, doi : 10.1029/2011GL047555.
- 気象庁 (2011) 日本の主な火山活動. 地震・火山月報 (防災編) 平成 23 年 3 月, 41–54.
- McGonigle, A.J.S., Oppenheimer, C., Galle, B., Mather, T. and Pyle, D. (2002) Walking traverse and scanning DOAS measurements of volcanic gas emission rates. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1985, doi : 10.1029/2002GL015827.
- Mori, T. and Burton, M. (2006) The SO₂ camera : A simple, fast and cheap method for ground-based imaging of SO₂ in volcanic plumes. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L24804, doi : 10.1029/2006GL027916.
- Mori, T., Mori, T., Kazahaya, K., Ohwada, M., Hirabayashi, J. and Yoshikawa, S. (2006) Effect of UV scattering on SO₂ emission rate measurements. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L17315, doi : 10.1029/2006GL026285.

(編集担当 青木陽介)