

差分吸収ライダーを用いた火山ガスフラックスの 遠隔モニタリング手法の検討

新井 達也, 阿保 真

東京都立大学大学院システムデザイン研究科 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Feasibility study on remote monitoring method of volcanic gas flux with differential absorption lidar

Tatsuya ARAI and Makoto ABO

Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: Since the gas components in magma are one of the main driving forces of the volcanic eruption phenomenon, understanding the behavior of volcanic gas is indispensable to understand the magma rise and eruption process. Currently, with the development of SO₂ measurement technology by the DOAS method using the ultraviolet scattered light of the sun, the amount of SO₂ emitted before and after the eruption is widely measured. However, this measurement method has the problem that it can only be measured during the day. In this study, we investigate a remote monitoring method for volcanic gas flux using a differential absorption lidar that enables continuous remote monitoring day and night.

Key Words: DIAL, volcanic gas, CO₂

1. はじめに

マグマ中のガス成分(主に H₂O と CO₂)は、火山噴火現象の主要な原動力の一つであるため、火山ガスの挙動を理解することは、マグマ上昇・噴火過程を理解するため(噴火予知)に不可欠である。また噴煙(マグマ性ガス)放出量(フラックス)のモニタリング観測は噴火活動強度に指標となる。現在太陽の紫外散乱光を用いた DOAS 法(Differential Optical Absorption Spectroscopy: 差分吸収分光法)による SO₂ 測定技術の発達により、噴火前から噴火後の SO₂ 放出量の測定が広く行われている¹⁾。しかし、この測定手法には2つの課題がある。まず、マグマの脱ガスを理解するためには SO₂ だけでは不十分である。なぜなら、SO₂ はマグマ成分の一部であり、主成分は H₂O と CO₂ だからである。また、この手法は太陽の散乱光を光源として、特定の気体分子によって特定の波長が吸収されることを利用して濃度を計測しているため、快晴の昼間しか測定ができず、リアルタイムに連続的なデータを収集することが不可能である。そのため近年では差分吸収ライダー(DIAL: Differential Absorption Lidar)を用いて火口上の噴気²⁾や噴煙中³⁾の CO₂ フラックスを測定する試みが行われている。

本研究では、昼夜問わず連続的に遠隔測定が可能な差分吸収ライダーを用いた火山ガスフラックスの遠隔モニタリング手法について測定方法やライダーの配置場所等についてシミュレーションする。

2. DIAL による火山ガスフラックスの測定原理

本研究では、Fig.1 に示すように DIAL で火山ガスを含んだ噴煙の流れを横からスキャンすることにより、遠方から火山ガスフラックスを推定する。まず、Fig.2 に示すように流れる噴煙に対して断面を切るように等角度間隔で DIAL スキャン観測を行い、各カラム濃度 Y_n [m⁻²] を次式から求める。

$$Y_n = \frac{1}{2\Delta\sigma} \ln \left(\frac{P_{on}(R_1)P_{off}(R_2)}{P_{off}(R_1)P_{on}(R_2)} \right) \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\sigma$ は吸収の強い on 波長と吸収の弱い off 波長の吸収断面積の差、 P は受信光子数である。Fig. 3 にシミュレーションによる on/off 各波長の受信信号の計算例と、設定したガスの濃度分布を示す。 R_1 , R_2 は図に示す噴煙の両端をとる。火山ガスのカラム濃度 $Y_{n,pl}$ は以下のように求められる。

$$Y_{n,pl} = Y_n - X_{n,bg} \cdot (R_2 - R_1) \quad (2)$$

ここで、 $X_{n,bg}[\text{m}^{-3}]$ は背景ガス濃度を表す。

次に得られた火山ガスのカラム濃度から、角度間隔に対応した幅 Δw をもった短冊状の濃度面積分 $[\text{m}^{-1}]$ を求め、それを和分することにより噴煙断面中のガス量 $S[\text{m}^{-1}]$ を求める。この値に噴煙移動速度(風速) $v_{pl}[\text{m/s}]$ を乗じて火山ガスフラックス $\Phi' = S \cdot v_{pl}[\text{s}^{-1}]$ を推定する。また、一般的に使われる単位で表したフラックス $\Phi[\text{kg/s}]$ はガスの分子量を M_{gas} 、アボガドロ数を N_A とすると次式で表すことができる。

$$\Phi = \Phi' \frac{M_{gas}}{N_A} \times 10^{-3} \quad (3)$$

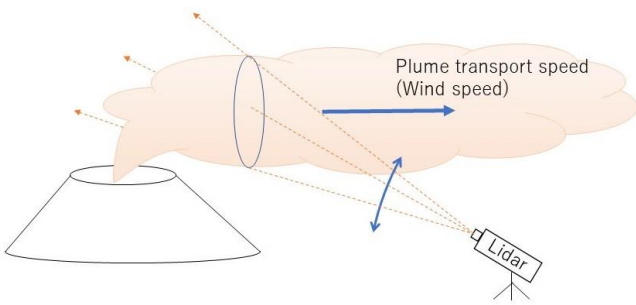


Fig.1. Method for estimation of the gas emission rate from volcanoes by the scanning DIAL.

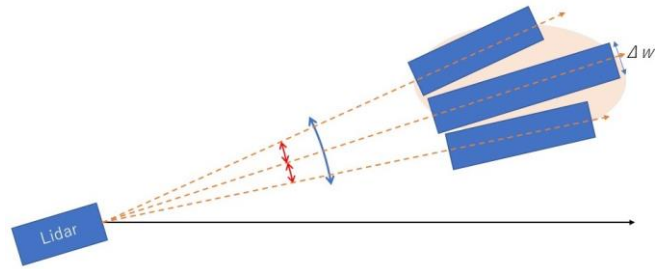


Fig.2. Principle for obtaining cross-sectional density by the scanning DIAL.

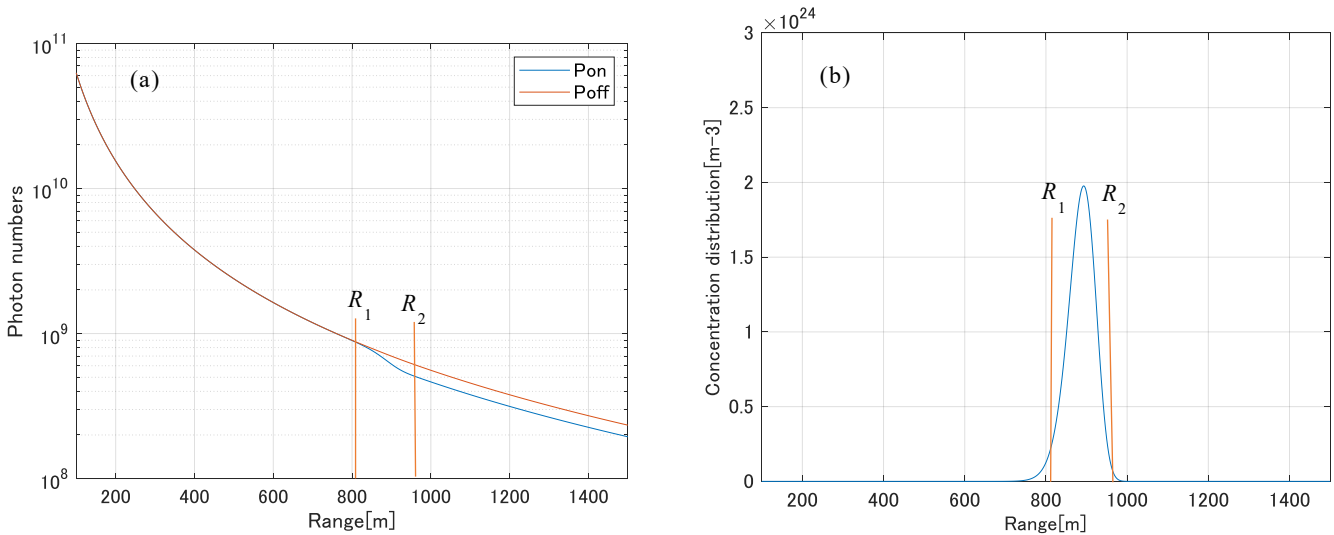


Fig.3. (a) Simulated DIAL signals, (b) gas concentration distribution, and the range of R_1 and R_2 for the gas column density measurement by DIAL.

3. フラックス推定における誤差

DIAL スキャン観測におけるフラックス推定の誤差は、次の3つが考えられる。

①カラム濃度誤差

各カラム濃度の相対誤差 $\varepsilon_{n,c}$ は P_{ij} の統計誤差を δP_{ij} とすると、以下の DIAL 誤差式により求められる。

$$\varepsilon_{n,c} = \frac{1}{2Y_{n,pl}\Delta\sigma} \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (\delta P_{ij}(R))^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここで、 δP_{ij} は各受信信号の誤差で、添え字の $i=1,2$ は R_1, R_2 , $j=1,2$ は on, off にそれぞれ対応する.

②断面濃度誤差

断面濃度の相対誤差 ε_s は実際の断面濃度が分からないため、あらかじめ濃度分布を仮定したシミュレーションによりカラム濃度誤差が十分小さい場合に次式の ε_s が十分小さくなるようにスキャン角度幅などを決めておくことにより、次式で求めることができる.

$$\varepsilon'_{n,c} = Y_{n,pl}\varepsilon_{n,c} \quad (5)$$

$$\varepsilon_s = \frac{(\sum_n \varepsilon'^2_{n,c})^{\frac{1}{2}}}{\sum_n Y_{n,pl}} \quad (6)$$

③フラックス推定誤差

最終的なフラックス推定誤差 ε_Φ は、噴煙移動速度（風速）推定の相対誤差を ε_v とすると次式で表せる.

$$\varepsilon_\Phi = (\varepsilon_s^2 + \varepsilon_v^2)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

4. 誤差シミュレーション

4.1 シミュレーションの目的

火山の噴煙は風向により流れる方向が変わり、ガスの放出量も火山の活動状態により大きく変動する. 継続的に火山活動をモニタリングするにはライダーの決まった場所に設置するのが望ましい. 一方 DIAL によるカラム測定誤差はガス濃度と測定距離に依存する. そこで、噴煙に向けてレーザを斜めに照射し、鉛直方向にスキャン観測を行い推定したフラックスの推定誤差が 10% 以内になるような条件を導出することで最適なレーザ設置場所やレーザの照射の方向の検討を行う.

4.2 シミュレーション条件

本シミュレーションでは火山活動のモニタリングを目的とするため、火山ガスとして CO_2 を選んだ. これは CO_2 が火山ガスの主成分であるとともに DIAL による観測実績があるためである. 火口からの火山ガスの排出量は、文献 1 の三宅島大噴火 (2000 年) の際の SO_2 の放出量と CO_2/SO_2 の比を参考に、噴火直後の 1000 t/day (11.6 kg/s) と比較的活動が安定した時期の 100 t/day (1.16 kg/s) と設定し、 CO_2 の背景濃度は 400ppm とした.

CO_2 の 3次元濃度分布は、風速を 2m/s とし、煙の拡散計算に用いられるブルーム式⁴⁾に SO_x の排出基準の計算で用いられる拡散パラメータ値を用いて計算した. ライダーの位置は火山の入山規制時の最小半径が 1 km であることを仮定して、Fig.4 に示すように火口から 1km の位置に配置した. 想定した CO_2 観測用 DIAL のパラメータを Table 1 に示す.

4.3 シミュレーション方法

カラム濃度誤差における統計誤差 δP_{ij} を求める際に、以下のライダー方程式とフォトンカウント法における統計誤差の式を用いる.

Table 1. Parameters of the CO_2 DIAL

Laser pulse energy	10 mJ
Shot number	1000
Background count rate	0
Excess noise factor	1
Primary mirror area	0.2 m ²
Optical transmittance	0.2
Scattering coefficient	2.0e-6 m ⁻¹ /sr
Extinction coefficient	6.0e-5 m ⁻¹
Laser wavelength	On:1581.478 nm Off:1581.578 nm
Absorption cross-section	On:5.8e-28 m ² Off:1.7e-29 m ²

$$\gamma = C_{ij} \frac{\nu_{ij}(R)}{R^2} \exp \left[-2 \int_0^R [n(R')\sigma_{ij} + \alpha_{ij}(R')] \right] dR' \quad (8)$$

$$\delta P_{ij} = \left[\frac{(\gamma + B)F + D}{\gamma^2} \right]^{1/2} \quad (9)$$

ここで、 C は装置定数、 ν は後方散乱係数、 α は大気消散係数、 B は背景光子数、 F は過剰雑音係数、 D はダークカウントを表す。

スキャン観測方法については、事前のシミュレーションにより Fig.2.のように3本のレーザを等角度間隔に照射することとし、その際 ε_s が十分小さくなるようなスキャン角度幅を求めた。風速の誤差は0とし、式(1)~(9)を用いて、 ε_Φ が10%以内になる領域を風向とレーザの照射角度 (Fig.4の θ)を変えて検討した。

4.4 シミュレーション結果

Fig.5に ε_Φ が10%以内で測定可能な領域を、噴煙中のCO₂の排出量が100 t/dayと1000 t/dayの場合について示す。例えば排出量100t/dayのとき、 $\theta=100\text{mrad}$ の方向にレーザの照射しスキャンする場合 ε_ν が10%以内で測定可能な風向 β の範囲は60~120°、排出量1000t/dayのときは50~170°であった。今回設定した条件の場合には、CO₂の排出量が100t/day、1000t/dayいずれの場合も火口近くを狙った $\theta=100\text{mrad}$ の方向へレーザを照射してスキャンすることにより、最も広い範囲の風向に対して対応できることが分かった。

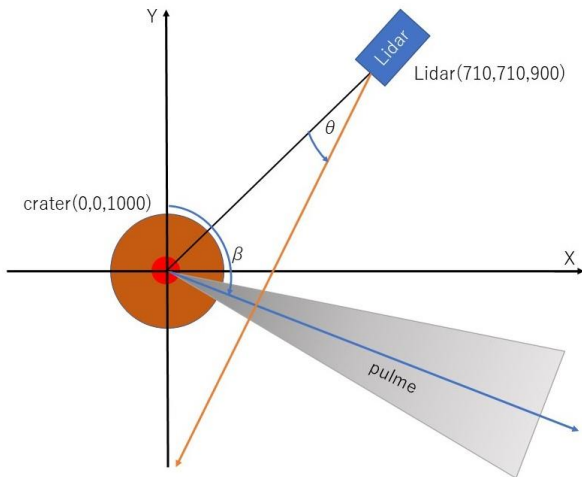


Fig.4. Positional relationship between volcano and lidar (Top view).

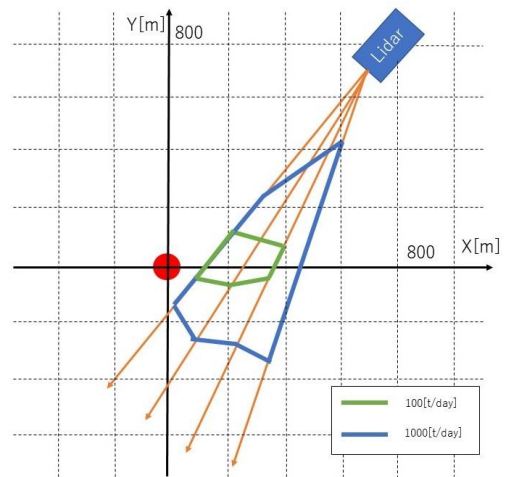


Fig.5. Area of wind direction with the flux error of less than 10% for different CO₂ emissions.

5. まとめ

本シミュレーション方法により、条件を設定すれば DIAL を用いた火山ガスフラックスの遠隔モニタリングの測定対応が可能な領域を得ることができると示された。また、遠隔モニタリングをするには噴煙のより根元部分を狙った測定が適していることがわかった。今回のシミュレーションでは風速誤差を0としたが、実際の観測では風速誤差を考慮する必要がある。風速の測定はライダーデータから信号強度の相関計算により測定することが可能であるため十分な風速精度は得られると考えられる。今後このシミュレーション手法を用いて、実際の火山を想定したより具体的な設置場所の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 篠原 宏志：火山 **50** (2005) S167.
- 2) A. Aiuppa et al.: Sci. Rep. **5** (2015) 13614.
- 3) A. Aiuppa et al.: Front. Earth Sci. **5:15** (2017).
- 4) 森 健彦：京大防災研年報 **61 B** (2018) 344.