

差分吸収法による火山ガス組成比のレーザーセンシング手法の検討

六笠 駿大, 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)

Differential Absorption Laser Remote Sensing of the Volcanic Gas Concentration Ratio

Shundai MUKASA and Makoto ABO

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

Abstract: It is known that volcanic gas composition ratios (concentration ratios) change depending on the active phase of a volcano, and measuring these changes in composition ratios can help predict eruptions. Current volcanic gas measurement methods include direct gas sampling and analysis, the DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) method using solar ultraviolet scattered light, and direct measurement of air containing volcanic gases by continuous multi-gas monitoring equipment. The DOAS method can only measure SO₂, so it cannot measure composition ratios, and observation is limited to daytime when the sky is clear. The multi-gas continuous observation system requires periodic maintenance of the gas sensor and cannot be installed in an inaccessible location. In this study, we investigated a method to simultaneously measure the concentrations of multiple components (H₂S, CO₂) in volcanic gases and remotely measure their ratios (composition ratios) by using a laser sensing technique based on the differential absorption method.

Key Words: IPDA, DIAL, Volcanic gas

1. はじめに

火山ガスの組成や放出量の変化はマグマや熱水系の温度・圧力変化と密接に結びついており、マグマや熱水の動きそのものを反映している地震や地殻変動とは異なる情報を与えてくれる。特に、火山ガス組成比（濃度比）の変化は火山の活動期によって変化することがわかっており、この組成比の変化を計測することで噴火の予測が可能となる¹⁾。現在の火山ガス計測には直接ガスを採取して分析する方法以外には、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) により SO₂ フラックスを測定する方法、マルチガス連続観測装置を火山ガスが噴出する場所に設置し、火山ガスを含む雰囲気を直接吸引し測定する方法がある²⁾。太陽散乱光を利用した DOAS 法は測定対象が SO₂ に限定されるため組成比の測定ができず、昼間の晴天時のみに観測が制限される。一方マルチガス連続観測装置は、連続観測が可能であるがガスセンサの定期的なメンテナンスが必要となり、人が入れない場所に設置することができない。

そこで本研究では、差分吸収法によるレーザーセンシング手法を用いることで火山ガスに含まれる複数の成分(H₂S,CO₂)濃度を同時に測定し、その比率（組成比）を遠隔で計測する手法の検討を行った。

2. 差分吸収ライダーの種類と原理

本研究では、Fig.1 に示すように火山ガスが噴出する噴気口の上をレーザービームが通過するようにレーザー装置を設置し、その散乱光強度を遠方から計測することにより火山ガスの組成比を測定する。測定対象ガスの吸収の強い波長と弱い波長の 2 波長を用いる差分吸収ライダーには、Fig.2 に示すように DIAL(Differential Absorption Lidar)と IPDA(Integrated Path Differential Absorption)-Lidar の 2 種類の方式がある。DIAL は連続的に分布しているエアロゾルなどによる弱い散乱光を利用した方式であり、IPDA は地面や山の斜面などの強い拡散反射光を利用した方式である。各方式とも平均気体濃度 $n(R)$ は次式から求められる。

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

ここで、 $\Delta\sigma$ は吸収が強い on 波長と吸収が弱い off 波長の差分吸収断面積、 P は各波長の受信光強度である。DIAL 方式の場合の R_2, R_1 は装置からレーザービーム上の任意の位置までの距離となるが、IPDA 方式の場合の R_2, R_1 は斜面などの拡散反射光が得られるレーザーの当たる位置と参照光強度を得る位置までの距離となる。

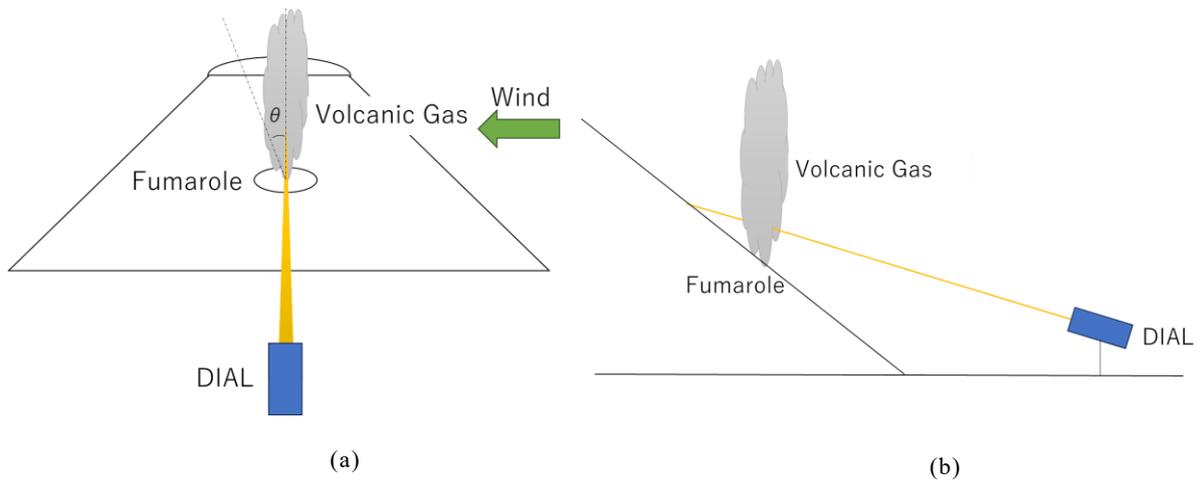


Fig.1 Schematics of DIAL measurement of volcanic gases emitted from fumaroles. (a) Front view, (b) Side view.

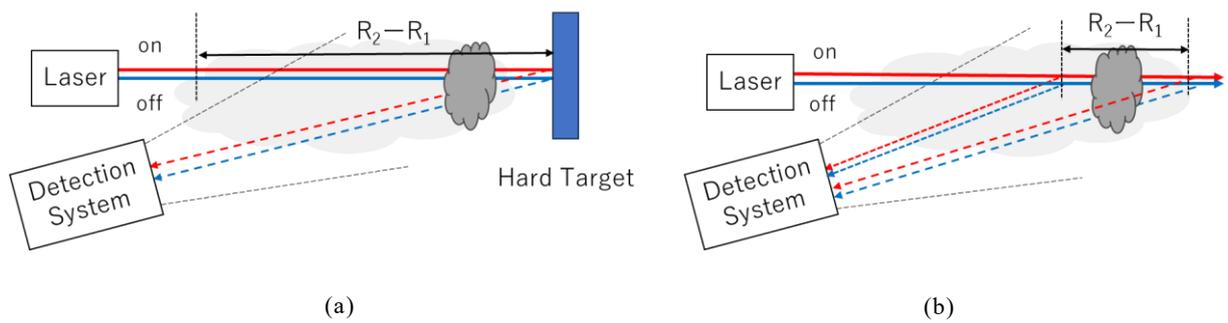


Fig.2 Comparison of laser absorption spectroscopy. (a)IPDA (b)DIAL.

3. 組成比測定 of 要求誤差

本研究では常時観測火山でありマルチガス連続観測装置が設置されているため火山ガスの濃度データが豊富な吾妻山（福島県福島市）を測定対象として想定した。Fig.3 に吾妻山に設置されたマルチガス連続観測装置により測定された $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の時系列を示す³⁾。(a)は非活動期、(b)は活動期を示している。活動期には $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が非活動期に比べて高くなっていることがわかる。実際の DIAL では吸収波長の関係から H_2S と CO_2 の測定を行うが、組成比を計測することで噴火時期を予測する可能性を検討するため、Fig.,3 より非活動期の組成比の標準偏差を求めたところ、組成比の平均値に対して約 20%であった。このバラツキは組成比の不均一性に起因するものと考えられる。そこで活動期と非活動期を判定するために要求される測定誤差は 20%以下とした。

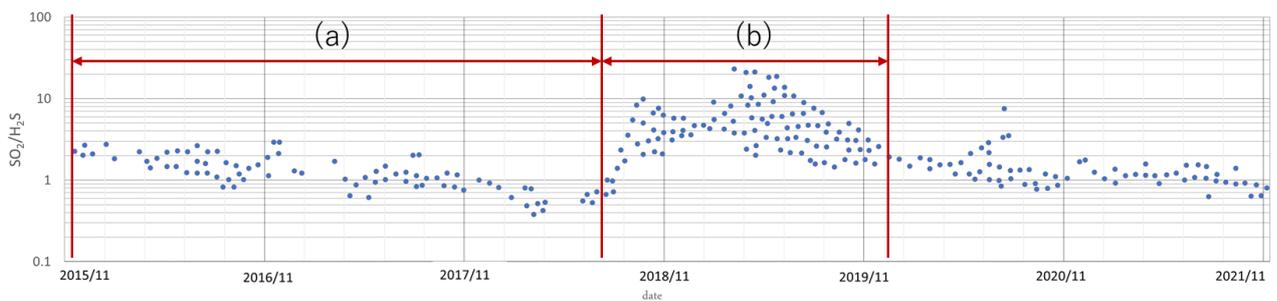


Fig.3 Time series of $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ ratio measured by the multi-gas continuous monitoring system installed at Mt. Azuma. (a)Inactive period, (b)Active period.

4. 誤差シミュレーション

4.1 シミュレーションの目的

最適な測定法並びにシステムの仕様を決定するために、まず測定精度に影響を及ぼす可能性のある要素を検討した。一つはレーザーの照射方向と噴気口からの距離の関係である。h 噴気口から離れた方向にレーザーを照射すると、ガスの拡散により濃度が低下するが吸収距離は長くなる。一方噴気口に近い位置に照射すると濃度は高くなる一方で、レーザーが通過する火山ガスの距離が短くなる。したがって、測定誤差を最小化するための最適な照射方向についての検討が必要である。また、火山ガスは風の影響で横に流される可能性があり、これが測定精度に影響を及ぼすことを合わせて考慮する必要がある。これらを踏まえて IPDA と DIAL の各方式において、各成分の統計誤差を比較し、誤差が小さい手法を検討する。

4.2 シミュレーションの条件

シミュレーションでは吾妻山において実際に監視カメラが設置されている場所にライダーを設置し約 1000m 離れている噴気口に向けてレーザーを照射することを想定した。

測定対象とするガスはまず Fig. 3 に示したように火山ガス濃度の実測値がある H₂S を選んだ。もう一つのガスは H₂S と吸収波長帯が重なっている CO₂ を選び、それぞれのガス濃度計測の統計誤差を計算する。シミュレーションに用いる H₂S 濃度分布は実測値を参考に設定した。CO₂ 濃度分布は想定した火山の吾妻山と同プレート上に存在し比較的に近い浅間山の CO₂/H₂S 比データを用いて設定し、CO₂ には背景濃度として 400ppm を加えた。使用したライダーパラメータを Table 1 に示す。H₂S と CO₂ の DIAL に用いる on 波長、Off 波長は Fig. 4 に示す吸収スペクトルより、測定ガスの差分吸収断面積差が大きく取れ、かつ干渉ガスの吸収断面積差が小さくなるように選んでいる。

Table 1. Parameters of the DIAL

Laser pulse energy	3.3 μJ
Receiving system efficiency	10 %
Receiving mirror diameter	0.3 m
Laser wavelength (H ₂ S)	on:1574.554 nm off:1575.026 nm
Absorption cross-section (H ₂ S)	on:3.24e-26 m ² off:1.60e-27 m ²
Laser wavelength (CO ₂)	on:1576.941 nm off:1576.902 nm
Absorption cross-section (CO ₂)	on:3.94e-27 m ² off:1.24e-27 m ²
Accumulation number	600,000

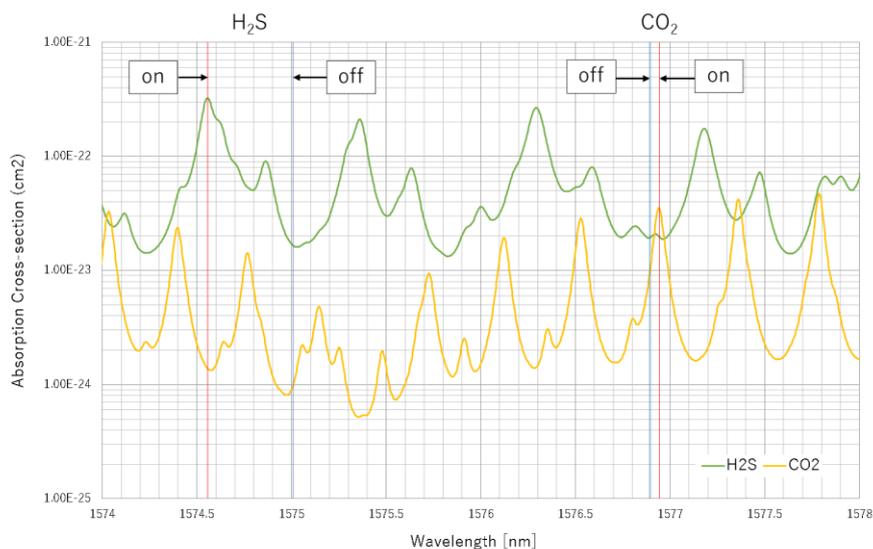


Fig.4 Absorption spectrum of CO₂ and H₂S and four laser wavelengths for the DIAL.

4.3 シミュレーション方法

統計誤差 δn を求めるために使用した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は以下の通りである。

$$P_i(R) = C \frac{\beta_i(R)}{R^2} \exp\left(-2 \int_0^R (n(r)\sigma_i + \alpha_i(\lambda)(r)) dr\right) \quad (2)$$

$$\delta n(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma(R_2 - R_1)} \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left(\frac{(P_{ij} + B)F + D}{P_{ij}^2} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここで、 C は装置定数、 β は後方散乱係数、 n は火山ガス濃度、 σ は吸収断面積、 α は消散係数、 B は背景光のフォトンカウント数、 F は過剰雑音係数、 D はダークカウント数である。また、 $i=1, 2$ は on 波長、off 波長を示し、 $j=1, 2$ は距離 R_1, R_2 を示す。

4.4 シミュレーション結果

Table 2に IPDA と DIAL 各方式における H_2S と CO_2 のカラム濃度並びに CO_2/H_2S 組成比の統計誤差を示す。シミュレーション結果から、IPDA 方式の方が統計誤差は小さくなることが分かった。Fig. 4に噴気ガスの傾きによる誤差と風が吹いていない場合の積算回数に対する組成比の統計誤差の変化を示す。これより IPDA の場合風が吹いていない場合は積算回数が 9000 以上、積算回数 600,000 の場合噴気ガスが風に流された時の傾きが 22 度以内なら誤差 20%以内で組成比の測定が可能であることがわかった。

Table 2. The relative errors of each gas and CO_2/H_2S ratio for the IPDA and DIAL

	H_2S	CO_2	CO_2/H_2S
IPDA	1.4%	3.1%	3.4%
DIAL	2.5%	5.3%	5.9%

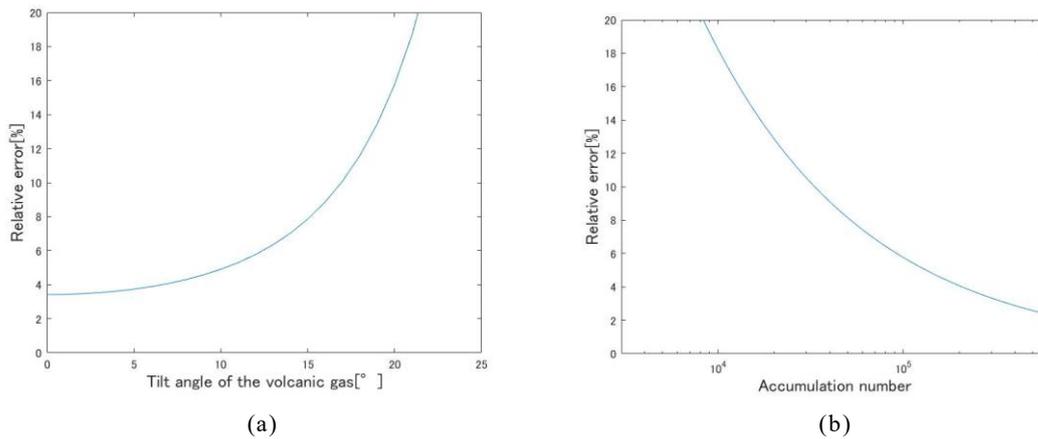


Fig.4 The relative error of CO_2/H_2S ratio (a) for tilt angle of the volcanic gas, and (b) for accumulation number.

5. まとめ

本シミュレーションの結果、吾妻山の火山ガスを遠隔で測定する手法として IPDA 方式の方が統計誤差は小さくなることが分かった。また、無風条件では積算回数を減らすことができるため、風が弱い日には測定時間を短くすることが可能であり、風が強い日には照射する時間を長くすることで誤差を小さくすることができる。今後は測定装置を試作するとともに、レーザ装置の持ち込みが比較的容易な箱根大涌谷で試験的な測定を実施し、本提案法の有用性評価を行うことを検討している。

参考文献

- 1) 篠原宏志：火山 **50** (2005) S167.
- 2) 高木朗充他：日本火山学会講演予稿集 (2016) 55.
- 3) 気象庁地震火山部火山課：験震時報 **86** (2022) 1.