

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2015

課題番号：15K12468

研究課題名(和文)火山噴出ガス濃度分布の遠隔計測のための携帯型吸収方式ライダーの開発

研究課題名(英文)Differential Absorption lidar for volcanic gas distribution

研究代表者

椎名 達雄 (Shiina, Tatsuo)

千葉大学・融合科学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80304187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、火山噴出ガスの中で最も毒性の極めて高い硫化水素 H₂Sガス濃度の空間分布状態を約 1km の遠方より高感度計測するための小型で携帯可能な吸収分光方式ライダー(レーザーダ)センサー装置の開発を目的としている。そのため、波長 1.5 μm 付近の近赤外域の目に安全で小型・高出力のLDレーザならびにファイバアンプ増幅器を試作し、2f検波法を用いて計測を行う。また、2次元方向にレーザ光を走査して背後の地面等からの散乱光を高感度検出して濃度・光路長積の定量測定を実現することを目的とした。実計測において、1,000-100ppm・mのH₂Sガス濃度計測を実現できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, our purpose is to develop the compact differential absorption lidar for the monitoring of H₂S gas distribution within 1km. H₂S gas is highly toxic volcanic gas. We used the 1.5 μm-band DFB-LD and a fiber amplifier as a lidar light source. The wavelength modulation spectroscopy was adapted. 2-dimensional Scanning trucker was installed, too. The column density against the ground was quantitatively estimated. As the results of concrete experiment, H₂S gas cells of 1,000ppm・m and 100ppm・m were measured and its column density estimation were evaluated.

研究分野：ガス計測

キーワード：硫化水素 ライダー 吸収 波長変調分光法 柱密度

1. 研究開始当初の背景

近年、日本列島では火山噴火活動の活性化が報告されており、直近の御嶽山噴火では多数の死者が出る深刻な被害が発生した。そのため、多数の活火山の噴火予知や救助活動において広い領域での人間に有害な毒ガス濃度の情報が必要となっており、遠隔的で広域の監視手段の実現が緊急課題となってきた。

現在の大气分子や汚染分子の計測法には吸引による化学的計測法や定電位電界型電気センサーなどのポイント測定法がある。しかし危険な領域での使用は制限される。また、広域空間分布の光学的測定法として連携研究者の久世らは、2点間の光路の長光路差分分光法(DOAS法など)やFFT分光法、差分吸収ライダー法(DIAL)などの開発を行って、多くの応用研究が進められている。しかしながら、装置のサイズが大型であるため、山岳域での利用には小型な装置の開発が期待されている。また工業分野では、メタンガスが主成分の都市ガスや天然ガスの利用が急速に発展し、首都圏だけでも6万kmに達するパイプラインや敷設ガス管が設置されており、その老朽化によるガス漏洩による事故が増大している。そのため遠隔計測や監視技術の開発が大いに期待されている。その例として、日本ガス協会による1998年から5カ年の研究プロジェクト「ガス導管漏洩対策技術開発」が実施され、漏洩メタンの携帯型や車載型のレーザー画像センサーの開発が推進された。それらのシステムの設計や動作確認の専門委員として連携研究者の久世や研究協力者の小林などが従事した。しかしながら、当時のレーザー技術の未熟さから装置サイズが大型で重量も大きく高価格などの問題点から以後の実用化の進展は見られなかった。

一方、近赤外域の半導体レーザー(LD)を利用した小型で携帯可能なメタンガスのレーザーセンサーがアンリツ(株)によって開発され、遠隔測定の実用性や小型・簡便性から広い実用化が進んでいる。その装置は約30m以内の地表面等からのレーザー散乱光を受信して、途中のガスの濃度の光路長積算値の高感度(1ppm・m以下)の測定が可能である。

また、最近ではファイバーレーザーや固体レーザー技術が急速に進展しており、赤外域でも小型化や高出力化の可能性が高くなってきており、これらの技術の活用による遠隔センサーとしてのライダーの新展開が期待されている状況である。

2. 研究の目的

本研究では、火山噴出ガスの中で最も毒性の極めて高い硫化水素 H₂S ガス濃度の空間分布状態を約1kmの遠方より高感度計測するための小型で携帯可能な吸収分光方式ライ

ダー(レーザーライダー)センサー装置の開発を目的としている。そのため、波長 1.6μm 付近の近赤外域の目に安全で小型・高出力のレーザー発振・増幅器を試作し、2次元方向にレーザー光を走査して背後の地面等からの散乱光を高感度検出して微量(約 1ppm・m 以下)の濃度・光路長積の定量測定を実現する。また、カメラによる風景画像にガス濃度分布を表示する機能を付加して簡易な動作法を確立して、高濃度域やガス放出量などの情報から災害の分析や救護活動などの対策立案のための災害情報計測システムとして役立てる可能性を短期間で検証するものである。

3. 研究の方法

メタンガスセンサーで導入されている 2f 検波法の H₂S ガスへの適用を確認した。

3.1 原理

スペクトル線幅の狭い DFB-LD 光源の中心周波数(波長)を H₂S ガス吸収線の中心に位置させ、特定の周波数 f 振れ幅 n_{FM} で変調する。そうするとガスを通して観測されるエコー波形には 2f の周波数成分が含まれる。この元の周波数 1f とガスの吸収を受けて現れた 2f 成分との比を用いることで、反射体の性質(反射率や形状等)に依存しないガス濃度の定量評価が可能になる。ここで、算出されるガス濃度は柱密度である。この測定原理を Fig.1 に示す。

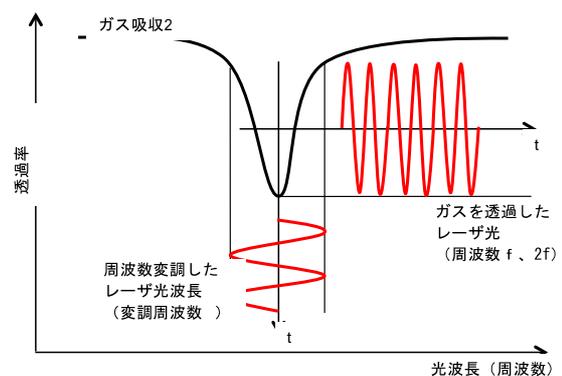


Fig.1 2f 検波法の原理

次に 2f 検波法の理論的考察を行った。

今、光源の周波数変調を次式で表す。

$$n(t) = n_c + n_{FM} \cos(2\pi ft) \quad \text{--- (3-1)}$$

ここで、 n_c : 変調中心周波数、 n_{FM} : 周波数変調幅である。

この光源を Lambert-Beer の法則に当てはめて、受信光の性質を得る。

$$P(t) = KS(t)\exp[-\mathbf{a}(\mathbf{n})C] \quad C = \int c(z)dz$$

$$= KS(t)[1-\mathbf{a}(\mathbf{n})C] \quad \mathbf{a}(\mathbf{n})C \ll 1$$

-- (3-2)

ここで、 $P(t)$: 受信光強度(W)、 $S(t)$: 出力光強度(W)、 K : 光学系受信効率、 $\mathbf{a}(\mathbf{n})$: 吸収係数(atm⁻¹cm⁻¹)、 C : 分圧光路長積(atm・m)である。

この受信光強度をフーリエ級数展開して、各周波数成分(DC成分、1f成分、2f成分)を求める。

$$P^{0f} = KS^{0f} \frac{H^{0f}}{2}$$

$$P^{1f} = KS^{0f} H^{1f} \quad (3-3)$$

$$P^{2f} = KS^{0f} H^{2f}$$

ここで、

$$H^{nf} = \left(\frac{2}{p}\right) \int_0^p \exp[-\mathbf{a}(\mathbf{n}_c + \mathbf{n}_{FM} \cos \mathbf{q})C] \cos(n\mathbf{q})d\mathbf{q}$$

$$n = 0, 1, 2, \dots \quad -- (3-4)$$

今、H₂S ガスの吸収プロファイルをメタンガスの吸収プロファイルと同じ、ローレンツ型を仮定するとして、

$$\mathbf{a}(\mathbf{n}) = SNg_L(\mathbf{n} - \mathbf{n}_0)$$

$$g_L(\mathbf{n} - \mathbf{n}_0) = \left(\frac{1}{p}\right) \frac{g_L}{(\mathbf{n} - \mathbf{n}_0)^2 + g_L^2} \quad -- (3-5)$$

ここで、 S : 分子の遷移強度(cm²mol⁻¹cm⁻¹)、 N : 密度(mol・cm⁻³atm⁻¹)、 \mathbf{n}_0 : 中心周波数(cm⁻¹)、

g_L : 半値半幅(cm⁻¹)である。

よって、

$$H_L^{nf} = \left(\frac{2}{p}\right) \int_0^p \exp\left[\frac{-D_0}{(x + A \cos \mathbf{q})^2 + 1}\right] \cos(n\mathbf{q})d\mathbf{q}$$

$$n = 0, 1, 2, \dots \quad -- (3-6)$$

ここで、 $x = \frac{\mathbf{n}_c - \mathbf{n}_0}{g_L}$: 変調中心の吸収中心からのズレ、

$A = \frac{\mathbf{n}_{FM}}{g_L}$: 相対周波数変調指数、

$D_0 = \mathbf{a}(\mathbf{n}_0)C = \frac{SNC}{pg_L}$: 光学深度である。

吸収スペクトルがローレンツ型では左右対称であることから、奇数次(1次)の H^{1f} は0になり、偶数次(0、2次)の H^{nf} は周波数変調成分のみをもつ。実際には吸収プロファイルは左右非対称であり、そこで、光源に振幅変調を追加し、

$$S(t) = S^{0f} [1 + m_{AM} \cos(2pft + f)]$$

$$\mathbf{n}(t) = \mathbf{n}_c + \mathbf{n}_{FM} \cos(2pft) \quad (3-7)$$

として、1f成分にオフセットを加味している。

$$P_0^{0f} = KS^{0f} \frac{H_0^{0f}}{2}$$

$$P_0^{1f} = KS^{0f} m_{AM} \frac{H_0^{0f} + H_0^{2f} \cos(2f)}{2}$$

$$P_0^{2f} = KS^{0f} H_0^{2f} \quad -- (3-8)$$

LD 変調波形を矩形波とし、かつ変調中心周波数を吸収中心とはずらす場合、(3-6)を変形して、

$$H_L^{nf} = \left(\frac{2}{p}\right) \int_0^p \exp\left[\frac{-D_0 g_L^2}{(\mathbf{n}_c + \mathbf{n}_{FM} \cos \mathbf{q} - \mathbf{n}_0)^2 + g_L^2}\right] \cos(n\mathbf{q})d\mathbf{q}$$

-- (3-9)

(3-1)より、

$$\mathbf{n}(t) = \mathbf{n}_c + \mathbf{n}_{FM} \cos(2pft) = \mathbf{n}_c + \mathbf{n}_{FM} \cos \mathbf{q}$$

-- (3-10)

(3-9)は次式となる。

$$H_L^{nf} = \left(\frac{2}{p}\right) \int_0^p \exp\left[\frac{-D_0 g_L^2}{\mathbf{n}(t)^2 + g_L^2}\right] \cos(n\mathbf{q})d\mathbf{q} \quad -- (3-11)$$

ここで、入射波を、矩形波とし、

$$\mathbf{n}(t) = \begin{cases} \mathbf{n}_{FM} & (0 < t < 1/2f) \\ -\mathbf{n}_{FM} & (1/2f < t < 1/f) \end{cases} \quad -- (3-12)$$

を(3-11)に代入することで、(3-8)を計算できる。その際、

$$x = \frac{\mathbf{n}_c - \mathbf{n}_0}{g_L} \quad -- (3-13)$$

で変調中と吸収中心からのズレを表すことができる。これにより、振幅変調を考慮せずに H^f にオフセットを加味できる。

結果として、2f信号を1f信号で割った比は次のようになり、ライダーの機器構成および計測距離によらず、対象のガスの成分に依存した変化を得られる。

$$\frac{P_0^{2f}}{P_0^{1f}} = \frac{h_0^{2f/1f}}{kg_L} D_0 \quad -- (3-14)$$

ここで、 $h_0^{2f/1f}$ はローレンツ型のプロファイルを導入することで次のように計算される。

$$h_0^{2f/1f} = \frac{2A}{(1+A^2)^{1/2} [1+(1+A^2)^{1/2}]^2} \quad -- (3-15)$$

2f / 1f の信号強度を最大とするためには、周波数変調振幅を吸収スペクトルの半値半幅の0.93倍にすることが示唆される。同様に、2f信号に対する信号強度を最大にするには、周波数変調振幅を吸収スペクトルの半値半幅の2.2倍にすることが解析から得られる。

3.2 解析結果

先の理論的考察に沿って、解析を行った。計算した結果を Fig.2 に示す。

計算条件として、以下のものを与えた。

LD 中心周波数 $\nu_C = \nu_0$

LD 周波数変調幅 $\nu_{FM} = 0.93g_L$

LD 強度変調指数 $m_{AM} = 0.1\nu_{FM} / g_L$

光学深度 $D_0 = 0.01$

これは、H₂S ガスの吸収係数として、 $1.1 \times 10^{-6}/\text{m}$ 、柱密度 $C_d = 9090\text{ppm} \cdot \text{m}$ を仮定したものである。DC 成分として表した、吸収スペクトル分布から、吸収量がわずかに 0.8% に満たないことがわかる。また、1f 成分、2f 成分の結果は、DC 成分の 1 次、2 次微分になっていることがわかる。

さらに、1f 成分、2f / 1f 成分の周波数変調振幅に対する変化を Fig.3 に示す。あらかじめ予測されたように、2f 信号では周波数変調振幅の 2.2 倍、ならびに 2f/1f 成分では周波数変調振幅の 0.93 倍で各信号の最大値が得られている様子が見られる。

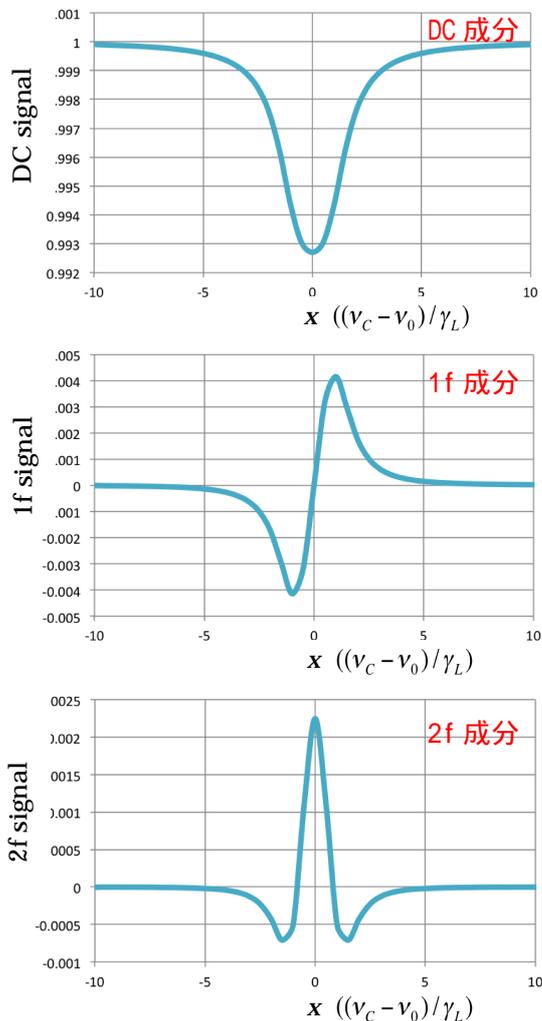


Fig.2 吸収スペクトル近傍での変調信号成分の算出結果

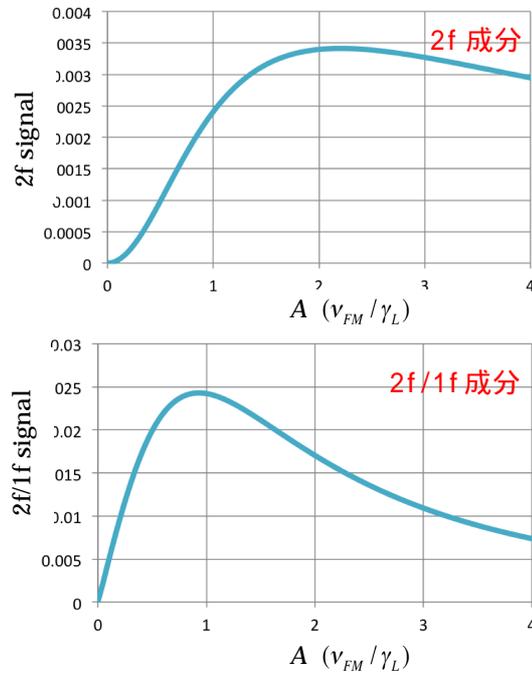


Fig.3 2f 信号、2f/1f 信号の周波数変調振幅に対する変化

4. 研究成果

先の理論的考察に従った実験系の構築を行った。

4.1 実験系の構成

Fig.4 に実験系の概要を示す。DFB-LD (Anritsu 製) は波長を 1578nm の H₂S ガス吸収線に中心周波数をロックし、変調器 (FG) にて周波数変調振幅を調整している。コリメートされたレーザービームはターゲットガスセルを通して壁等で反射され、再びガスセルを通して受光される。受光したエコー光は変調器 (FG) の信号と同期してロックインアンプ (LA) で周波数成分毎に検出される。

今回はターゲットガスとして、1,000ppm · m ならびに 100ppm · m の濃度の H₂S ガスセルを用いて実験を行った。解析で行った周波数変調振幅に対する各周波数成分の波形を計測する際は、LD に流す電流を制御することで実験を行っている。

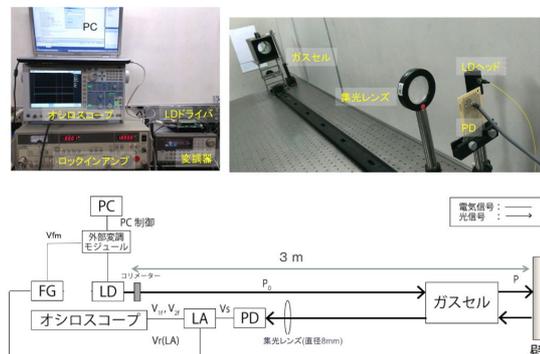


Fig.4 実験系の構成

4.2 実験結果

ターゲットガスを用いた測定の結果を Fig.5 に示す。1,000ppm・m のガスを用いた際は理論解析の結果と同じ、1f、2f 成分の信号を得られていることがわかる。一方で、100ppm・m の測定では、1f 信号で左右の高さが異なっていることがわかる。これは周波数変調振幅に伴って、電流量が増加する際に、出射光強度も変化していることが原因である。1,000ppm・m の測定では目立たなかったが、100ppm・m の測定では吸収量が微弱になってきたことで、強度変化の影響が出てきている。

また、2f ならびに 2f/1f の周波数変調振幅に対する変化を求めた結果を Fig.6 に示す。この結果も先の理論解析の結果と同等の波形を得ることができたが、2f 信号は理論値よりも小さい変調振幅で最大値を得ている。2f/1f 信号は理論通りの結果である。これは用いた測定器(スペアナ)の分解能に依存したもので 2f/1f で比をとった際には相殺されたものと考えられる。

ガス濃度の算出には(3-14)に示した 2f/1f の比を用いた計算を行って、結果を評価した。1,000ppm・m の結果から、

$$C_d = 2,048 \text{ ppm} \cdot \text{m}$$

100ppm・m の結果からは

$$C_d = 330 \text{ ppm} \cdot \text{m}$$

を得た。

測定ではガスセルを往復で計測しているために、それぞれ、2,000ppm・m ならびに 200ppm・m のガス量となる。したがって、1,000ppm・m のガスセルの結果が良好である。一方、100ppm・m の結果では誤差が大きい。この原因として、1f 信号に現れている出射光強度の変化に起因した要因が考えられる。今後、この出射光強度の変化を加味し、加えて、ローレチアン型を仮定したため、此の出射光強度の変化に依存した吸収分布の左右非対称性を加味する必要がある。

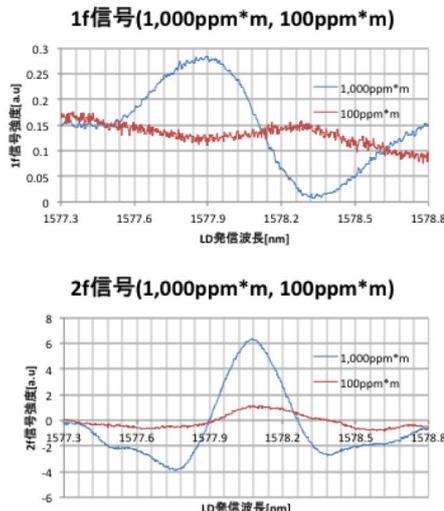


Fig.5 ターゲットガスセルによる 2f 検波法

測定実験

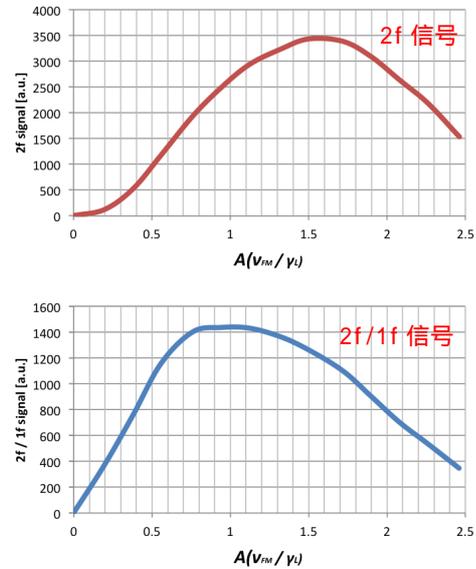


Fig.6 2f ならびに 2f/1f の周波数変調振幅に対する変化

4.3 長距離ならびに高感度化に対する対応

実験では DFB-LD 単体では出射光強度 20mW を 2W にまで増強させるためにファイバンプ (Keopsys 社製) を導入し、加えて送信光ビーム径を 30mm に拡大している。これによってターゲットに当たる光の揺らぎを軽減させている。また、受信光学系には 127mm のカセグレン式望遠鏡を導入し、受光量の増加を図っている。これにより、1,000m までの計測範囲の拡大ならびに数十 ppm・m の受光感度の確保を目指している。スキャン計測を想定して、トラッカー上に配置している。Fig.7 に装置概要を示す。

本助成の期間中に送受信光学系の効率や視野重なりの基本特性まで計測と評価を行った。今後、工場地帯や火山・温泉地域での現場計測へと発展させていく予定である。

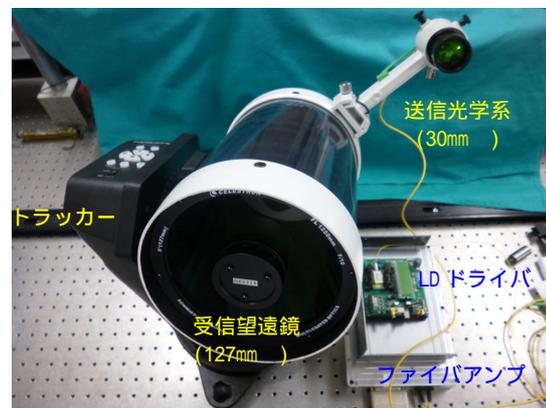


Fig.7 高出力・スキャン対応

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

椎名 達雄 (Shiina Tatsuo)
千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授
研究者番号：80304187

(2)研究分担者

なし ()

研究者番号：

(3)連携研究者

久世 宏明 (Kuze Hiroaki)
千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・教授
研究者番号：00169997