

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800252

研究課題名(和文) 可変波長中赤外線レーザーによるレーザーレーダーを用いた火山性ガスの遠隔検知の実現

研究課題名(英文) Development of remote sensing system for volcanic gas using a laser-radar by the tunable-wavelength Infrared laser

研究代表者

富田 孝幸 (TOMIDA, Takayuki)

信州大学・学術研究院工学系・助教

研究者番号：70632975

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究によって、中赤外線光源および遠隔検知システムを開発を推進した。本課題の研究期間中に以下の点が示された。

(1) 中赤外線レーザーによって、気相体の吸収スペクトルを検出可能である。(2) 共焦点光学系・冷却空間フィルターによって雑音・熱雑音・検出空間の限定により感度の向上が可能である。(3) ファンアウト構造のPPMgSLT結晶の使用で励起光の入射位置を掃引し、3-4 μ mの波長掃引能を有する中赤外線レーザーが作成可能である。(4) 車載可搬型レーザーレーダーにより1km遠方の山体からの散乱光を検出可能である。検出された散乱信号から具に山体表面の状態などが判明する。

研究成果の概要(英文)：The mid-infrared light source and a remote sensing system was to promote the development in the project. The following points have been shown in the during the application period.

(1) We can detect the absorption-spectrum of the gas phase objects by the mid-infrared laser. (2) We improve the sensitivity by control of the noise, thermal noise and detection space, using the confocal optical system and cooling-spatial-filter. (3) By sweeping the incident position of the excitation light to PPMgSLT crystal that is fan-out structure, infrared laser has a wavelength sweeping ability of 3-4 μ m. (4) Portable laser radar can be detected scattering-light of laser from the mountain at the 1km. The state of the moutain-surface from the detected scattered signal is found in detail.

研究分野：レーザーセンシング

キーワード：レーザーセンシング 遠隔検知 中赤外線 火山ガス

1. 研究開始当初の背景

(1)位置づけ：

現在まで継続的な状況であるが、2012年は、東日本大震災や火山性地震、霧島山・新燃岳の噴火など自然災害によって生活が脅かされており、自然災害に対する研究、予知における必要性、緊急性は高まっていた。それまでも、火山噴火のメカニズム解明に向けた研究や噴火活動前後の火山性ガス等の観測は様々な研究者によって積極的に行われており、このような状況下において、火山性ガス等の測定により火山活動を継続的に監視することは極めて重要である。

(2)国内外の研究の動向：

噴火活動と火山性ガスの関係は様々な研究者によって示されている。火山性のガスと噴火強度の相関などが観測されている。火山によって火山ガスの種が異なることは、両者の関係を一般化するのを妨げていると考えられる。また、現在の桜島の噴火警戒レベルは3であり入山規制が例として挙げられるが、多くの有益な情報が得られる活動火山での観測には高い危険が伴い、測定手法に限られるのも大きな要因の一つである。

(3)着想の経緯：

このような状況の中で研究代表者、東京大学 地震研究所 武多氏などのワークショップにて遠隔地から安全に安定した火山活動の観測の手法として注目されている手法としてLIDARによる火山ガスの吸収スペクトルの計測方法を検討した。また、火山性ガスの吸収スペクトル(図1)を収集し中赤外線による吸収分光の可能性を検討し、火山性ガスの遠隔検知を推進するには既存の赤外線の吸収分光し火山性ガスを測定する手法にレーザーによる観測方法を取り入れることが不可欠と判断し申請に至った。

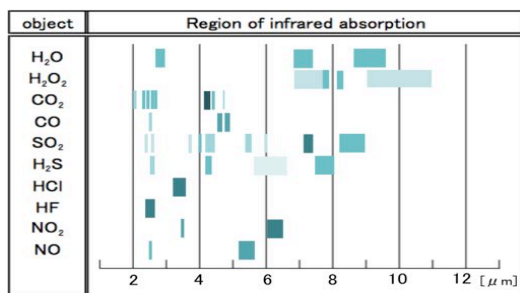


図1 火山性ガスの吸収スペクトル

2. 研究の目的

本研究では、最終的な目標を『1 km 以上の遠隔観測で中赤外線の吸収分光を実現』とおき、研究期間内に光源・受信機を開発し、屋

外での観測性能の実証までを目的とする。

これは、既存の太陽赤外線を吸収分光し火山性ガスを測定する手法に遠隔検知可能な手法であるレーザーレーダーの手法を取り入るうえで不可欠な R&D のプロセスであり、火山性ガスの吸収特性をレーザーレーダーによる遠隔検知で測定する全く新しい観測手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究は大きく下記の3項目に分けることができる。

(1)可変波長中赤外線レーザーの開発

申請当初および本研究の初年度において研究代表者は理化学研究所 光グリーンテクノロジー特別研究ユニットに所属しており、最終目標となる波長可変中赤外線光源を得るための励起光として、理研にて開発済みであった赤外線波長可変レーザーシステム(図2)の使用を予定していた。このシステムは Cr:ZnSe 結晶を用い波長可変領域2.1~2.65 μm のコヒーレント光源である。図3に示すように使用予定であった ZGP 結晶による OPO で3~6 μm を得るには適している。本研究では上記の励起光および OPO 結晶を用いて中赤外線の光源の開発を試みる。

(2)受光検出器の開発

本研究では単純に対象からの戻り光を検出するだけではなく、火山性ガスによる吸収といった微弱な受信レベルの変化を捉える必要がある。このため、受光検出器には高感度・低雑音といった熱輻射の影響もある中赤外線検出器には開発の困難が予想される。また、本研究の開発期はフィールドでの検出が最終目的であるため可搬性能も選定の際には重視される。

赤外線検出器には量子型および熱型のものがある。量子型は熱型の100~1000倍の検出能力があるため、遠隔検知には量子型の方が適しており、波長2~6 μm の赤外線を検出する場合、HgCdTe (MCT) や InSb 等の素子として用いた量子型の検出器が感度および帯域の面で最も適している。

量子型の検出器を使用する際には熱雑音を低減するために冷却する必要がある。冷却を行う方法は、液体窒素を入れるデュワー使

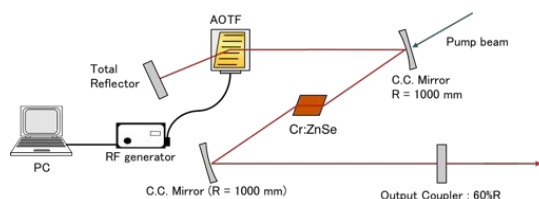


図2 赤外線波長可変レーザーシステム開発：理化学研究所光グリーンテクノロジー特別研究ユニット(現：光量子工学研究領域 光量子制御技術開発チーム)

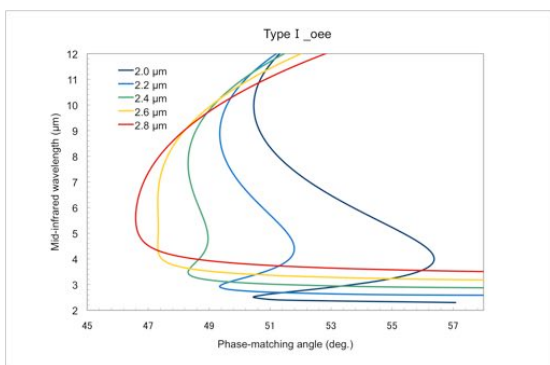


図3 ZGP 結晶の OPO における中赤外光のチューニング曲線例

用するものや電子冷却、スターリングクーラーを用いるものがある。本研究のように、最終的に、屋外使用、可搬型への展開を考慮しなければならない場合、取り扱いに注意を要し、かつ環境の影響を受けやすい液化窒素を使用するデューワー方式以外のものを採用する必要がある。

さらに、検出性能の向上のために集光効率の向上、観測対象波長のみを透過させる光学フィルターおよび観測対象外における熱雑音の除去に空間フィルターなどによる雑音除去の技術の導入を試みる。

(3) 屋外観測性能の実証試験

本研究の最終目標は火山地帯といった過酷環境でのフィールド観測である。このため可搬性・操作性や耐久性といった可搬機特有の性能も求められる。本機で求められる可搬性は研究拠点から観測地付近までの車載での長距離移動と観測地付近から観測ロケーションまで短距離移動の2つの要素が挙げられる。車載時には耐震面や収納時の大きさが重要となる。観測は屋外であり観測前の作業は最低限のものにすることが即時性を問われる本研究の対象の場合には不可欠である。1台のコンピュータでの装置の自動制御によって操作の簡素化を図る。これら一貫の観測を平坦な路面や観測地で行うことを想定するのは困難である。これらの確認のために開発機を山間部へ持ち運び疑似観測を行うことで可搬性能の実証を試みる。

4. 研究成果

(1) 平成25年度(初年度) 課題『可変波長中赤外線レーザーの開発』

①結晶の選定

本研究で用いるレーザーシステムの要求を満たす結晶の選定を行い、その特性を評価する。

本研究は理化学研究所で既存の赤外線波長可変レーザーシステムを励起光に光パラメトリック発振(OPO)を行うことで中赤外線を得るものである。OPO結晶は二リン化亜鉛ゲルマニウム(ZnGeP₂, ZGP)を使用の予定であったため、理研所有のZGP結晶で発振の

試験を行った。

②光パラメトリック発振システムの共振器設計
2~6μmの発振可能なOPOシステムの共振器設計を行い、システムを開発する。ここでは理化学研究所 同研究室所属の湯本氏から知識面・技術面で多大なる協力を頂きながら推進し設計に至った。キャビティミラーにはZnSeを基板に使用し下記の仕様であれば発振可能であることが求められた。

●設計した共振器ミラーの仕様

Mirror 1

S1: AR: R<3%@2.1~2.7 μm

HR: R>98%@3~6 μm

S2: HR: R>98%@6~10 μm

Mirror 2

S1: HR: R>98%@2.1~2.7 μm

S2: R : R=80%@3~6 μm

HR: R>98%@6~10 μm

③光源の性能評価をする。

湯本氏の協力により結晶購入前に理化学研究所の資材を用いて試験的に発振器を構成し、実験室レベルでの検出試験を行った。また次年度の計画である検出部の一部の開発に着手していたため、これを用いてアセトンを用いた吸収スペクトルの検出試験も行った。試験の概略を図4に示す。また、図5にFTIRで計測したアセトンの吸収スペクトルと試験で得られた吸収スペクトルを示す。理化学研究所の資材を拝借したため、設計した仕様とは異なる結晶およびミラーではあるが、設計した構成で可変波長中赤外線光源が得られることが確認できた。また、検出器のノイズおよび光源のばらつきを解消するためにレーザー出力を相対的にモニターし構成を行うことが必要と判断された。

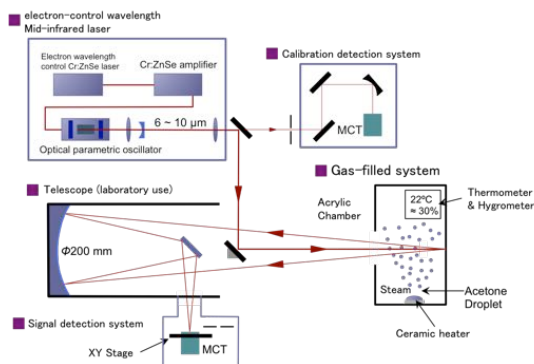
④ZGP 入手に関する問題

試験により理化学研究所既存のCr:ZnSe可変波長レーザーとZGP結晶によるOPOで中赤外線光源が得られることが分かった。その一方で、予算ではZGP結晶は購入可能なものの冷却機、発振器ミラーなどOPOに必要な素材全てを入手するのは、申請当初からの価格の変動などにより困難となった。このため別のより安価な結晶の検討を余儀なくされた。

⑤転属による問題

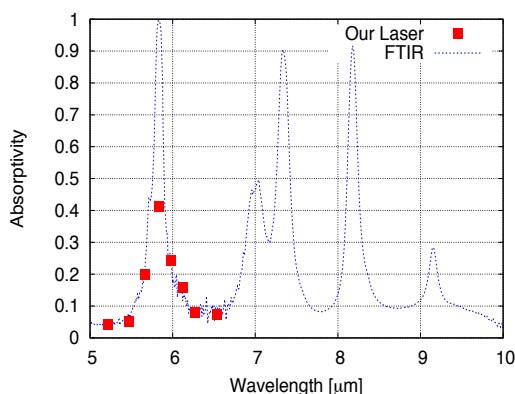
加えて、翌年度から研究代表者が現職である信州大学へ転属することとなった。このため、申請当初は2μmの赤外線波長可変レーザーシステムやミラーマウントなどを理化学研究所の既存のシステムや資材を使用予定であったが、これらの代替品の入手も必要となった。特に赤外線波長可変レーザーシステムの構築には大規模な予算や研究代表者にはない技術が含まれるために④の事情と

合わせて新規に光源システムを考案する必要が発生した。また、計画に先んじて開発を



進めていた受光検出部の再構築も必要となった。

図4 アセトン吸収スペクトル計測試験
光源構築:理化学研究所光グリーンテクノロジー特別研究ユニット



(現: 量子工学研究領域 量子制御技術開発チーム)

図5 アセトンの吸収スペクトル

⑥問題の打開策

④⑤の問題を受けて、広く一般的なレーザーである Nd:YAG レーザーで中赤外線が得られる PPMgSLT を選定した。PPMgSLT は $3\text{--}4\ \mu\text{m}$ と発振可能領域は狭くなるが、火山性ガスに広く含まれる H_2O および H_2O の同位体物質である D_2O (重水) や HCl の吸収スペクトルがこの領域であったため採用となった。この変更に伴い共振器ミラーには YAG 基板を採用し、使用は下記のものとした。下記に仕様を示す。

●変更後の共振器ミラーの仕様

Mirror

S1:	AR:	$R < 3\% @ 1064\text{nm}$
	HR:	$R > 99.8\% @ 1493\text{--}1629\text{nm}$
S2:	AR:	$R < 5.0\% @ 3067\text{--}3700\text{nm}$

また、計画前倒しで選定済みの中赤外線検出器(テルル化水銀カドミウム・ HgCdTe : MCT)を購入した。この選定に関しては次項に記す。

(2) 平成26年度 課題『受光検出器の開発』

平成26年度より研究代表者は信州大学へと職を移す。前年度より持ち越された課題である『中赤外線光源(変更案)の開発』と『受光検出部の再構築』を推進するために実験環境の立ち上げから行った。

①実験環境の構築

信州大学にて共同で研究室を主宰する齊藤教授より光学定盤および中赤外線発生の OPO 励起光源として使用する Nd:YAG レーザーを拝借した。光学定盤のピッチが 5cm と通常より広い仕様であったため、 2.5cm ピッチのプリントボードを搭載し対応した。また、研究室費用によりミラーマウントなどの光軸調整用資材の一式を取り揃えた。

②赤外線検出器の選定

この項目は初年度より推進している。3-(2)に記載したとおり、赤外線検出器は熱雑音の除去が不可欠である。検出器を最も冷却可能な方法としてデュワー装着型検出器を用いて液体窒素での冷却が挙げられる。しかし、液体窒素の使用は今回のような可搬型かつ観測方向動かす装置の場合は、安全性を考慮すると不向きである。そこでペルチェによる電子冷却型・スターリングクーラー型の2つを候補とした。理化学研究所で所有する両装置を比較するとスターリングクーラー型は冷却性能では勝るがモーターによる電磁ノイズが大きいことが判明した。また、応答速度などの観点からも VIGO 社製 PVI-3TE-6 を採用した。

③受光検出部の設計

受光検出部は集光するための望遠鏡と検出器ユニットからなる。望遠鏡には比較的小型で可搬性が高いカセグレン式望遠鏡(MEADE LX200-25)を採用した。採用した検出器の感面は $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ と小さい。検出器ユニットには、雑音除去のためには光学波長フィルターおよび冷却空間フィルターの搭載が必要である。このため受光部の望遠鏡から検出器までの光伝送系に共焦点光学を採用し、共焦点を結ぶための2枚のレンズ間の光路上で平行光となることを利用し光学波長フィルターを設置した。また、検出器直前の焦点には冷却空間フィルターを取り付け、観測視野の中心(レーザー光路上)からの戻り光のみを検出することと同時に周囲からの熱雑音への対策を行った。図6に設計図を示す。

また、4-(1)-③より、送信系のレーザーには相対エネルギーモニターを搭載を決定した。

④検出器ユニットの開発

検出器ユニットでは共焦点部と冷却空間フィルターの開発が必要であった。共焦点を結ぶためのレンズには赤外線に適した BaF_2 素材の $f=40\text{mm} \cdot f=200\text{mm}$ の2つを採用し、光学波長フィルターにはサファイアに誘電

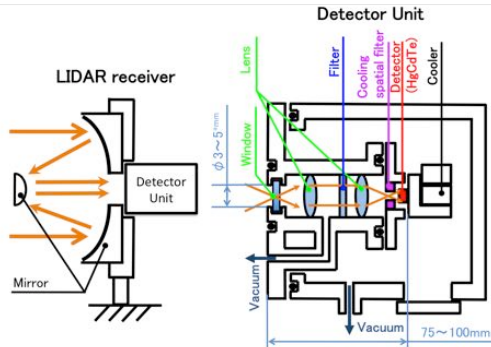


図6 受光検出部の設計図

体多層膜を施したものを採用した。冷却空間フィルターはペルチェの冷却面に銅製のφ1mmアイリスを熱伝性ボンドで取り付け、放熱面にはCPU冷却などに使用される放熱フィンを取り付けた。図7に検出器ユニットの試験器の写真を示す。



図7 検出器ユニットの写真

光学系の軸中心からの信号のみを受信する仕様であるため、正方形(20mm×20mm)のセラミックヒータを光源として、そのエッジの検出空間分解能から受光範囲、空間フィルターの有/無から効果を割り出した。図8にヒーターを1mmずつ動かした際の位置と検出信号の関係を示す。

検出器とヒーターは350mmの距離を隔てており、検出器の視野角は35°であるため本来であれば、形状の取得は困難である。図8(上図)からは半値幅評価で3mm程度の空間分解能が得られており、共焦点光学系の搭載によって、未搭載よりも狭い領域からの信号のみを受信していることが確認された。また冷却フィルターを取り外すと信号が強調されず周囲の熱雑音を受信していることを確認した。図8(下図)に空間フィルターを取り除いた際の信号を示す。

⑤中赤外線光源(変更案)の設計

設計変更により、ファンアウト構造の結晶の使用によって、励起光の波長を掃引するのではなく波長変換結晶へ入射する位置を掃引することで発振波長の

可変を実現することとなった。このため、結晶と冷却系をXYZステージへ搭載する。共振器の概念図を図9に示す。

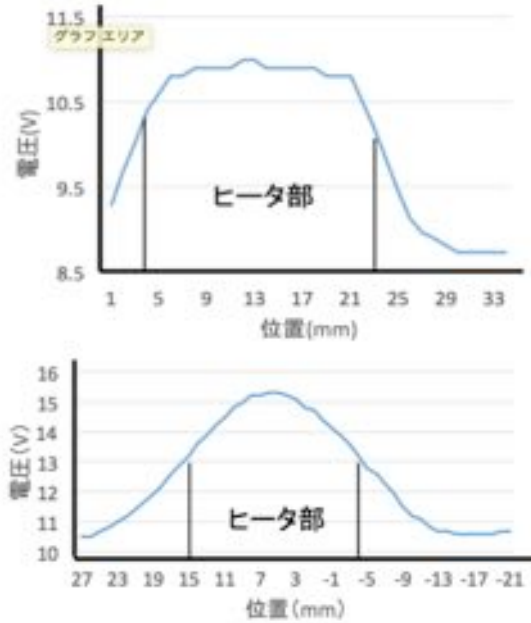


図8 検出器ユニットによる検出信号
(上)空間フィルター有り
(下)空間フィルターなし

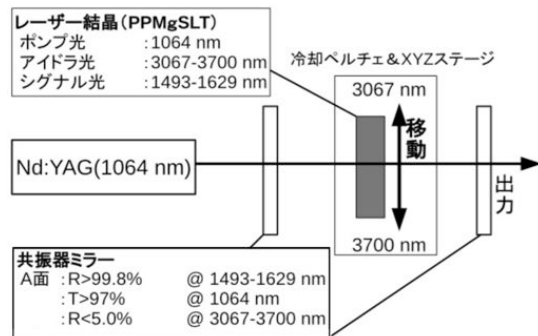


図9 共振器の概念図

(3)平成27年度(最終年度) 課題『屋外観測の実証』最終年度は、フィールド観測に耐える観測システムを構築する。

①可搬機の構築

本システムは、レーザーを射出する送信系、戻り光を検出する受信系およびこれら装置の制御系から構成されている。全ての機器は可搬性を確保するために台車に搭載する。光学機器を搭載するため耐震性を考慮し台車には医療用ストレッチャーを利用した。これにより車載での可搬性能を向上させるとともに観測地での移動性も確保し、より能動的な観測を実現している。また、観測地での移動や観測方向の変更の後に観測視野とレーザーの光軸が一致するようにレーザー射出部を受信機に直接搭載した。レーザー光の観測視野中心への伝送部までを一体化させた。また、システムの電力は可搬型発電機で賄うことが可能であり、より

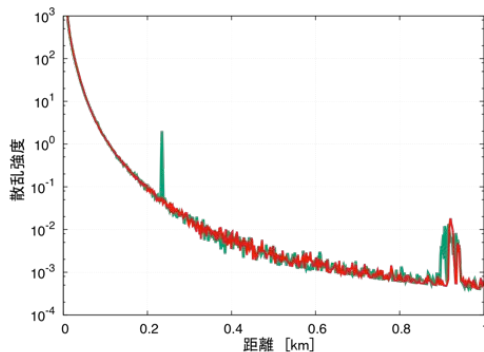
フィールド観測に最適化した。装置の写真を図10に示す。



図10 可搬型レーザーレーダー（試験機）

②屋外観測

試験機を信州大学から約30km離れた山中にある長野県小川村の「星と緑のロマン館」駐車場にて西側約1km遠方の山体に向けて観測試験を行った。検出された山体による散乱光の信号を図11に示す。横軸はレーザー射出から観測までの時間に光速を乗算し、1/2にすることで散乱点までの距離に換算されている。縦軸は受信強度に距離の二乗で割ることで散乱点での散乱強度相当に換算されている。図中の赤線と緑線は同一方向の観測である。一様に減少する信号は大気による散乱を示しており、両信号共に900m遠方で山体の散乱による強い信号が検出された。緑の信号の250m付近で見られる強い信号は風に煽られた樹木の枝葉にレーザーが照射されたためである。レーザーの一部は枝葉によつ



て散乱された後にも、枝葉による信号がない赤線の信号と同様の信号強度である。これにより、望遠鏡視野の一部や光軸上に少々の遮蔽物が存在しても可観測であることを示し、本研究の最終目的であるような過酷環境のフィールド観測が可能なシステムであることが確認できた。

図11 レーザーレーダーによる信号

レーザーが山体に到達する直前には山体に繁茂する樹木の信号が最初に検出され、枝葉を突き抜けて信号が小さくなった後に地表面での散乱が確認されている。両信号において最後の散乱信号が同一の距離にて確認さ

れることから地表からの信号と考えられる。これにより、レーザーレーダーシステムで1km遠方の山体からの散乱が検出可能であり、信号から具に山体の様子まで理解可能であることも確認できた。

(4)総括

本研究によって、下記の点が示された。

- 中赤外線レーザーによって、気相体の吸収スペクトルを検出可能である。
- 共焦点光学系・冷却空間フィルターによって雑音・熱雑音・検出空間の限定により感度の向上が可能である。
- ファンアウト構造のPPMgSLT結晶の使用で励起光の入射位置を掃引し、3-4 μ mの波長掃引能を有する中赤外線レーザーが作成可能である。
- 車載可搬型レーザーレーダーにより1km遠方の山体からの散乱光が検出可能である。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

①桜井雅朗、富田孝幸、斉藤保典、火山ガス遠隔検知のための波長可変中赤外線レーザーの開発、p53-C06、平成27年度 応用物理学会 北信越支部 学術講演会、2015年12月12日、信州大学 工学部キャンパス (長野県長野市)

②清野恵祐、富田孝幸、斉藤保典、中赤外線検出システムの開発、p54-C07、平成27年度 応用物理学会 北信越支部学術講演会、2015年12月12日、信州大学 工学部キャンパス (長野県長野市)

③桜井雅朗、清野恵祐、富田孝幸、斉藤保典、波長可変中赤外線レーザーを用いた吸収スペクトル計測器の開発、P25-p76-70、第33回レーザーセンシングシンポジウム、2015年9月10-11日、大田区産業プラザPiO (東京都大田区)

④T. Tomida et al., (他4名)

“Remote sensing of volcanic gases using wavelength-tunable mid-infrared laser” IAVCEI 2013 Scientific Assembly (2013.7), Kagoshima Japan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富田 孝幸 (TOMIDA, Takayuki)
信州大学・学術研究院工学系・助教
研究者番号：70632975

(2) 研究協力者

湯本 正樹 (YUMOTO, Masaki)
理化学研究所・光量子工学研究領域
光量子制御技術開発チーム・研究員