

MHz～THz 帯の遮蔽物内での伝送特性の解明

代表研究者 川 上 由 紀 福井工業高等専門学校 電子情報工学科 講師
共同研究者 栗 島 史 欣 福井工業大学 電気電子工学科 准教授

1 研究開始当初の背景

2014 年 9 月に御嶽山で噴火が起こり、59 名の死亡が確認されている。当時は、気象条件の悪化による 2 次災害のおそれから、捜索が途中で打ち切られている[1]。また、3 年経った 2017 年現在においても、5 名が行方不明のままとなっている。捜索自体をより短時間で行うことができれば、すべての被災者を発見できたはずである。つまり、災害発生時により早く捜索する方法を考える必要がある。現在、自然災害における人命救助では電波が利用されている。例えば、雪山で遭難者がビーコンを所持していれば、送信する電波を頼りに捜索を行うことができる。しかし、ビーコンは約 3 万円～5 万円であり、決して安くはない。将来は登山者全員が所持することを考慮し、より安価で簡単に持ち運べるものが必要となる。

そこで、RFID(Radio Frequency IDentification)を用いたシステムを提案し、その実現に向けて研究を進めてきた。これまでに我々が共同で予備実験を行っている中で、THz 波による灰の透過特性が通常の大気よりも向上する現象が確認されている(図 1: レーザーカオス光を用いた THz 時間領域分光法装置を使用)。また、MHz 波の実験においても受信強度の上昇が確認されており、これらの原因の究明に向けて解析が始まっているところである。

安価、小型かつ軽量の THz 波の発生技術および高感度検出技術の基礎研究が確立することで、今後必要となる高速伝送の波源生成技術が確立し、情報通信分野における新たな産業基盤形成を行える。また、埋設物を通した通信技術の基礎特性を明確にすることで、災害対策の基礎的知見を得ることとなり、安全安心な社会基盤生成の基礎となる。

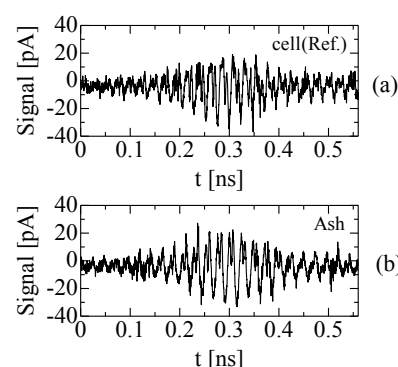


図 1 THz 波による灰の透過特性
(a) サンプルのみ (b) サンプル+灰

2 研究の目的

テラヘルツ波(周波数 0.1THz～10THz, 波長 3mm～0.03mm: 以下 THz 波)は、電波的な物質透過性を有する最短波長領域であり、物質を非破壊かつ非接触で測定・診断することができる。そのため、異物検査や危険物検査など、様々な用途への発展が期待できる[2-4]。図 2 に示すように、1THz 以上の THz 波は大気中での減衰が大きいという特徴を持つが、0.1THz～1THz の比較的低い周波数帯においては減衰率が少ないため、将来のオープンスペースでの大容量高速無線通信での利用も期待されている。

一方、雪崩、土砂崩れ、噴火など自然災害の多いわが国において、災害救助の迅速化は喫緊の課題である。登山者などに発信機を身につけさせることで、雪、土砂、火山灰中でも発見できることが予想されるが、各遮蔽物による周波数毎の伝送特性は未解明である。また、探索優先順位を判断するために要救助者の周囲の画像情報や脈拍数・体温などの生体データを送受信することを考えると、大容量通信が求められる。これまでの実験により、火山灰においては 900MHz 帯の伝送特性が向上することが分かっている。また、予備実験として行った THz 帯の伝送実験においても同様に伝送特性の向上が見られた。各種災害発生時に遭難者を探索する新たな探索システム

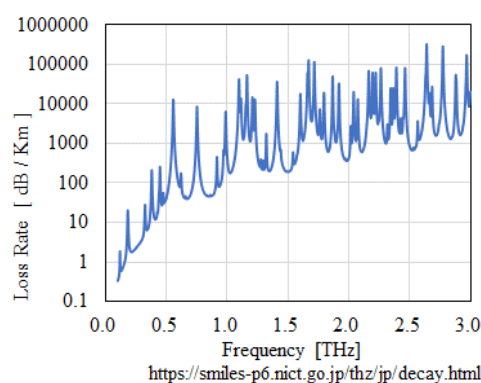


図 2 大気中における THz 波の減衰

の実現に向け、減衰率が少なくかつ大容量通信可能な最適な周波数を明らかにしていく必要がある。

本研究では THz 波の安価、小型軽量、高安定な発生検出技術を確立し、火山灰中における電磁波の伝送特性を、MHz 帯から THz 帯まで広く調べ明確にすることで、次世代探索システムにおける最適周波数を明らかにする。

3 研究内容および成果

3-1 遮蔽体として使用する火山灰

火山灰とは、火山岩が粉々になった細かい粒子(直径 2mm 以下のもの)のことを指す。また、火山灰が生じるのは火山が爆発するとき、高温の岩雪崩が火山の山腹を流れ落ちるとき、赤熱した液状の溶岩がしぶきとなり飛び散るときなど様々ある。外見は、火山のタイプや噴火の仕方によって異なり、色は明るい灰色から黒まで、形は小石くらいの大きさからパウダー状のものまで存在する。

本研究で使用する火山灰は、鹿児島県鹿児島湾に位置する桜島火山のものである。南岳山頂火口は 1955 年(昭和 30 年)10 月の爆発以来、今日まで長期間にわたって活発な噴火活動が続けている。そのため、噴出物(火山ガス・火山灰・火山礫・噴石など)や 爆発時の空振、二次災害としての土石流など各方面に被害を及ぼしている。南岳の東山腹 8 合目に位置する昭和火口は、2006 (平成 18) 年 6 月に 58 年ぶりとなる噴火活動を再開し、2008 年以降活発な噴火活動が継続している。また、現在も活発な火山活動が行われていることから、火山灰の入手が容易である。

実際に研究に使用した火山灰を図 3、桜島火山灰の成分表を表 1 に示す[5]。

表 1 桜島火山灰の成分表



図 3 今回使用した火山灰

成分		割合[%]
二酸化ケイ素	SiO ₂	60-61
アルミナ	Al ₂ O ₃	16-17
酸化鉄	Fe ₂ O ₃ , FeO	6-7
酸化カルシウム	CaO	6-7
酸化ナトリウム	Na ₂ O	2-4
酸化カリウム	K ₂ O	1-2
酸化マグネシウム	MgO	2-4
酸化チタン	TiO ₂	1以下
強熱減量		1以下

3-2 Sub-THz 波の時系列・スペクトル変化の研究および遮蔽物の伝送特性の測定

(1) THz 発生および検出装置

図 4 および図 5 に THz 波発生・検出装置の接続図および写真を示す。接続図中の青線と赤線はそれぞれ発生側と検出側の光路を示している。本研究では多モード発振の半導体レーザーカオス光と光伝導アンテナを用いて THz 波を発生させる。また、軸合わせのために He-Ne レーザーを使用している。

半導体レーザーからの出力はビームスプリッター1(BS1)によって外部鏡(M2)と THz 波発生及び検出系に分割される。外部鏡 M2 で反射された光がレーザーに戻ることで光学的遅延帰還がレーザーに加わり、時間平均のスペクトルが安定し、空間的コヒーレンスに優れるカオス光が発生し、高安定・広帯域な THz 波が得られる[6]。またレーザー光のスペクトルをリアルタイムで見るため、BS2 によりレーザー光の 10%を CCD タイプのスペクトルアナライザに透過させている。90%の反射されたレーザー光は、BS3 により THz 波発生側と検出側に同じ割合で分割される。発生装置には AC70Vpp の電圧が加えられており、レーザー光がアンテナに照射されたことで発生する電子正孔対のキャリアが加速される。縦モード間の光ビートによりキャリア密度が変化することで発生側アンテナ中の電流が変化し電流の微分に比例して THz 波が発生する。

プリズム 1(P1)は自動可動レールに設置されている。これを一定の間隔・時間で端から端まで移動させる

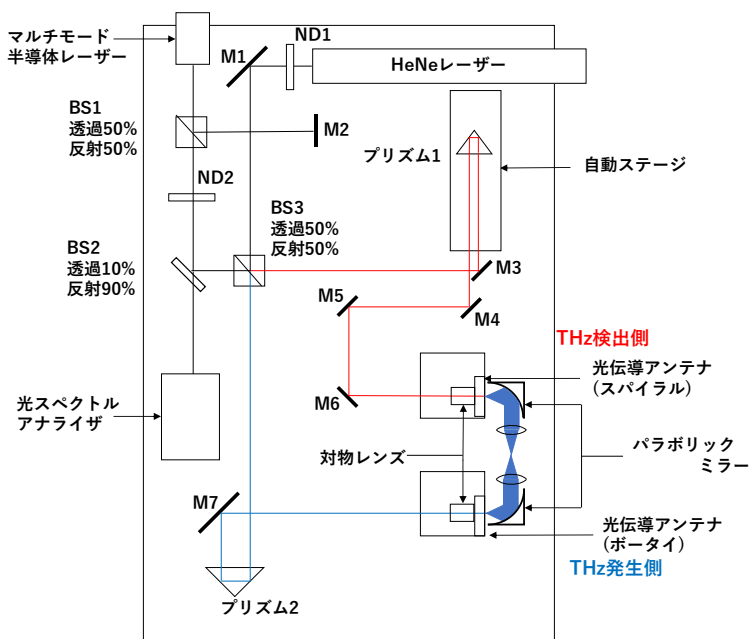


図 4 THz 発生検出装置の接続図

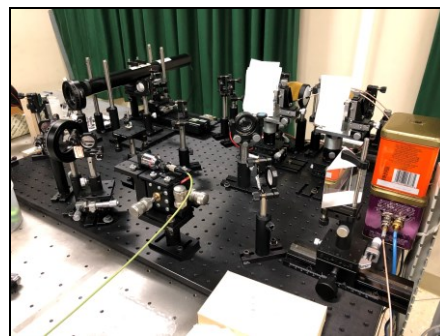


図 5 THz 波発生検出装置

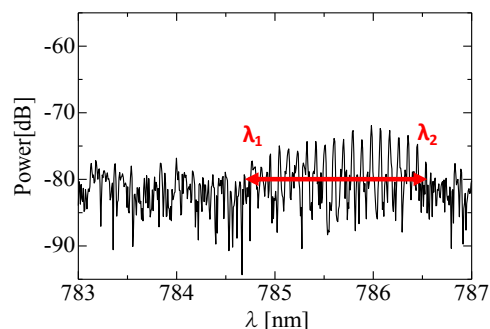


図 6 カオスレーザー光のスペクトル

ことにより、レーザー光の THz 波に対する時間遅延を変化させる。検出器上でレーザー光と THz 波の相互相関をとると、遅延時間の関数として時系列を観測できる。信号はロックインアンプを通し電流として取り出すことができる。取り出した電流の大きさが、電磁波の信号振幅となる。BS3 から発生器までと BS3 から検出器までの距離が一致すると、レーザーカオス光では相互相関が最大となり、最大の Sub-THz 波を取り出すことができる。距離を一致させるにはマイクロメートル単位の微調整が必要となるため、プリズム 2 をマイクロメータ付き手動ステージを用いて調整する。

また、発生した THz 波を集光するための集光用レンズをパラボリックミラーの間に取り付ける。集光用レンズの間に伝送特性を調べたい遮蔽体を配置し、伝送特性の測定を行う。

図 4、5 に示した THz 波発生検出装置においてレーザー光の出力がカオス化しているかを確認するため、光スペクトルアナライザを用いてレーザー光のスペクトルを観測した。その結果を図 6 に示す。図 6 より、カオス化させることで広いスペクトルが得られていることがわかる。また、スペクトルのパワーがピークより -10dB 以内に収まる範囲は、波長が λ_1 (784.94nm) ~ λ_2 (786.47nm) の間である。これを周波数に変換すると 381.45THz ~ 382.19THz となり、差周波 0.74THz の Sub-THz 波が得られうることがわかる。

(2) Sub-THz 波の測定

サンプルを挿入していない状態で THz 波が発生しているかの確認を行った。図 4 で示した実験系の発生系で Sub-THz 波を発生させ、検出系に接続したロックインアンプより測定を行った。図 7 に発生した Sub-THz 波の時系列を示す。縦軸は信号強度、横軸は遅延時間を表している。

BS3 で分割した後の検出器までの 2 つの経路の距離が一致したとき、時系列は最大値を示す。自動可動レールを全体で 8.4cm 動かしたが、中心の 4cm (図 7 では $t=2.45 \times 10^{-10}$ s) 付近で信号強度が最大になっている。測定結果より、今回組み立てた装置によって THz 波の発生に成功していることがわかる。

図 7 の結果をフーリエ変換したものを図 8 に示す。ここでは、ロックインアンプより取り出した電流値をフーリエ変換している。ロックインアンプのパラメータは、時定数 100[ms]、参照周波数 40[kHz] である。レールを 40 μ m ずつ動かしながら電流値を 2048 回測定することで、Sub-THz 波を再現している。また、サンプリング周波数は 3.75[THz] である。

図 8 は横軸を周波数、縦軸を信号振幅としている。図 8 より、47.6 GHz、91.6 GHz、0.14 THz にスペクトルがみられる。最も振幅が大きいの 47.6 GHz であり、その 2 倍、3 倍の周波数において波が発生している。0.14 THz 以降の信号はノイズに隠れて確認できない。本研究では、Sub-THz 波にあたる 0.14 THz の波を用

いて伝送特性の解明を行う。

(3) 火山灰中における Sub-THz 波の伝送特性

製作した発生及び検出装置を用いて火山灰中における Sub-THz 波の透過率の測定を行う。測定では、厚さ 5mm のガラス製のサンプルセルを用意し、測定対象物を入れる。また、このサンプルセルを発生検出装置のパラボリックミラー間に配置する。

本研究では、火山灰中の伝送特性を明らかにするため、火山灰中透過後の Sub-THz 波信号強度の測定を行った。また、火山灰中における Sub-THz 波信号強度の比較対象として、空気中透過後の信号強度を測定した。火山灰中と空気中、2 つの透過率から、空気中に対する火山灰中の比透過率を求めた。測定に使用する周波数はいずれも 0.14THz 帯である。尚、どちらの場合においても別日に複数回測定を行った。

火山灰が入ったサンプルセルを配置した場合の測定結果を図 9 に、空気が入ったサンプルセルを配置した場合の測定結果を図 10 に示す。図 9 および図 10 より、0.14THz において、火山灰透過後の信号振幅は空気を透過した場合よりも高くなっていることがわかる。別日に行った測定においても同様の結果が得られており、それぞれの結果に対して空気中に対する火山灰中の比透過率を算出した。結果を図 11 に示す。Sub-THz である 0.14THz に着目すると、比透過率は 1 回目測定時に 110%、2 回目測定時に 103%となっており、空気中に比べ火山灰中の方が 0.14THz 帯の Sub-THz 波が透過しやすいことが分かった。今回製作した装置によって検出可能なその他の周波数を見ると、47.6GHz においても比透過率が 100%を超えていることがわかる。91.6GHz においては、比透過率が 1 回目に 72%、2 回目に 89%となっており、火山灰を配置することで THz 波が減衰していることがわかる。

空気中に比べ火山灰中の方が透過しやすい原因として、空気中の場合は水蒸気が Sub-THz 波を吸収し、信号を減衰させていることが挙げられる。火山灰中は空気中に比べ含まれる水分が少ないため、減衰が少ないと考えることができる。ただし、91.6GHz 帯のように、火山灰を配置することで信号が減衰してしまう周波数もあるため、さらに広い周波数において比透過率を明らかにする必要がある。

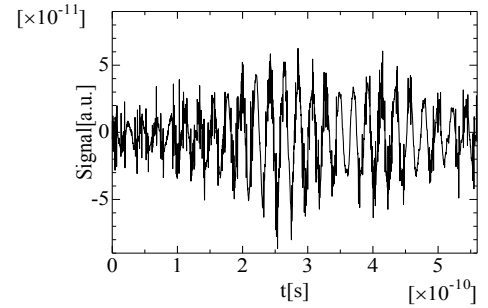


図 7 THz 波時系列

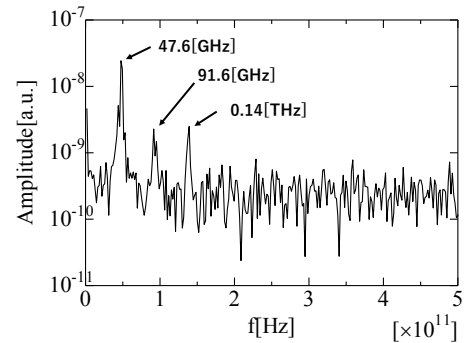


図 8 THz 波時系列のフーリエ変換

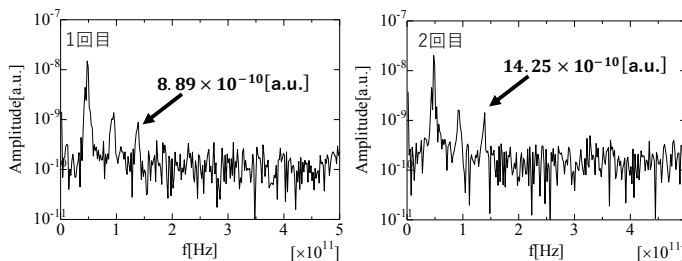


図 9 火山灰透過後の Sub-THz 波

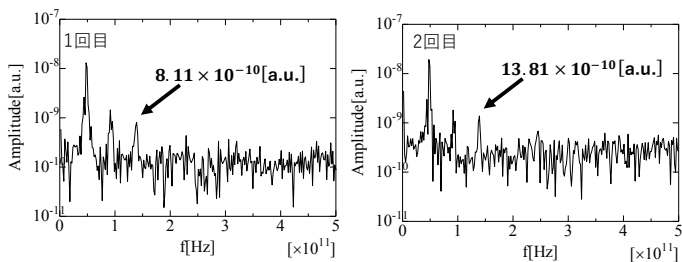


図 10 空気透過後の Sub-THz 波

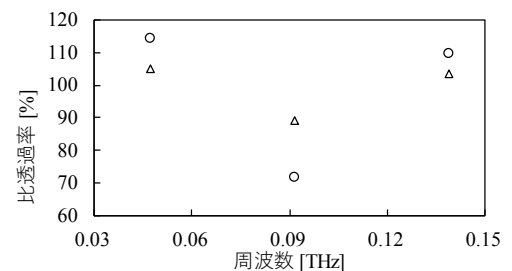


図 11 空気中に対する比透過率

3-3 MHz 波による遮蔽物の伝送特性解析

(1) 火山灰中における MHz 波伝送特性の測定方法

本研究では、RFID を用いて MHz 波の火山灰中における伝送特性を測定する。UHF 帯 RFID モジュールとしてアートファインックス社の URW-SP4 を使用した。同社ソフト ITagWriter を使用することでタグ内のデータの読み書きや、RSSI(Received Signal Strength Indicator)値の取得ができる。RSSI 値とは、RFID モジュールのアンテナが RFID タグから受信した電波の強度であり、数値が高いほど安定した通信が出来ていることを示している。本研究では、RFID モジュールのアンテナと RFID タグの間に火山灰を配置し、火山灰中の MHz の伝送特性を観測する。

MHz 波伝送特性の測定系を図 12 に示す。図 12 に示すように、内寸 10cm×10cm×100cm の発泡スチロールを使用し、タグとアンテナとの距離を 0cm から 100cm まで 10cm 刻みで変化させ、RSSI 値を 50 回ずつ測定する。タグが火山灰中に埋まっている場合と、火山灰表面にある場合との 2 通りについて測定した。

(2) 火山灰中における MHz 波の伝送特性

比較のため、まずは空気中における MHz 波の伝送特性を測定した。測定結果を図 13 に示す。図 13 の青線は周波数ホッピング機能を使用した場合、橙線は周波数ホッピング機能を使用しない場合の測定結果を示している。周波数ホッピングを使用した場合、受信強度が高くなる最低周波数を選択するため、アンテナ-タグ間距離が離れても通信特性が維持されていることがわかる。ホッピングなしの場合は、アンテナタグ間距離が離れるにつれ、受信強度が低下していることがわかる。同一周波数での比較を行うため、以降は周波数ホッピング機能を使用せずに 921MHz において測定を行う。

アンテナ-タグ間に火山灰を配置した場合の測定結果を図 14 に示す。青線は火山灰表面に RFID タグを配置した場合、橙線は火山灰内にタグを配置した場合の測定結果を示している。図 14 より、タグが火山灰表面に配置されている場合、灰の堆積量が 60cm までは受信強度が減少していくが、70cm 以降で受信強度が向上していることがわかる。それに対して、火山灰内部に配置した場合、空気中と同様で、アンテナ-タグ間距離が離れるにつれ受信強度が下がっていることがわかる。

図 15 にて、火山灰中にタグが埋まっている場合と、空気中の場合の結果を比較した。青線がアンテナ-タグ間に火山灰を配置した場合、橙色が何も配置しない場合の結果を示している。図 15 より、空気中に比べ、火山灰中の方が受信強度は 5~10dB 程度低くなっていることがわかる。このことから、MHz 波が火山灰により吸収されていることがわかる。ただし、堆積量が 90cm の場合においても通信可能であるため、探索システムへの利用可能性が認められる。

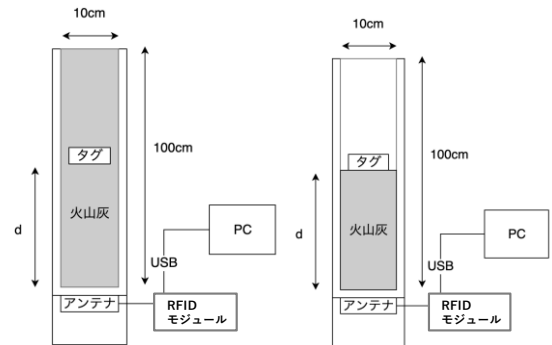


図 12 MHz 伝送特性の測定系

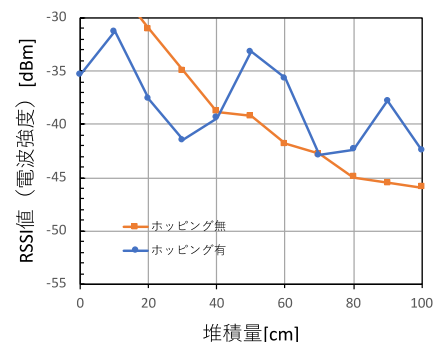


図 13 空気中の MHz 波伝送特性

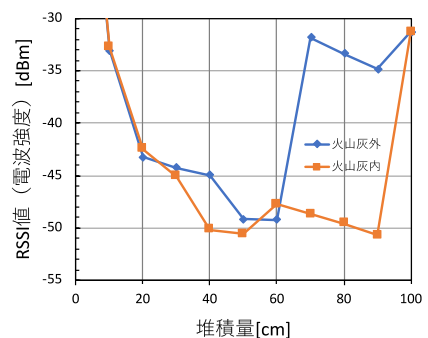


図 14 火山灰中の MHz 波伝送特性

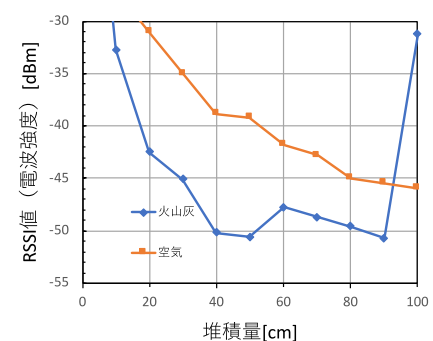


図 15 火山灰と空気との比較

4 まとめ

本研究では市販の RFID モジュールおよび製作した THz 発生検出装置を用いて、火山灰内における伝送特性を MHz 帯、Sub-THz 帯において調査した。

MHz 帯においては、空気中と比較すると通信特性は劣化するものの、火山灰の堆積高が 90cm の場合においても通信可能となっており、探索システムにおける利用可能性の高さが示された。

Sub-THz においては、製作した安価な発生検出装置において、0.14THz の波を発生検出することができた。また、測定結果より、空気中に比べ火山灰中の方が 0.14THz 帯の Sub-THz 波を透過しやすいことが分かった。空気中の伝送特性測定の場合は、水蒸気が Sub-THz 波を吸収し、信号を減衰させたと考えられる。対して、火山灰中は空気中に比べ、含まれる水分が少ないため、減衰も少ないと考えることができる。

以上の結果から、水分を含まない遮蔽物間での探索であれば、より多くの情報を伝送できる Sub-THz 波が有効であるといえる。

【参考文献】

- [1] 総務省消防庁災害対策本部, "御嶽山の火山活動に係る被害状況等について (第 40 報)", 2015.
- [2] A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani and K. Kawase: Appl. Opt. 43(2004)5637.
- [3] N. Karpowicz, H. Zhong, C. Zhang, K. -I Lin, J-S Hwang, J Xu, and X. -C. Zhang: Appl. Phys. Phys. Lett. 86 (2005) 054105.
- [4] 大谷 知行, 有吉 誠一郎, 佐々木 芳彰, 川瀬 晃道: 応用物理 75 (2006) 188.
- [5] 鹿児島県工業技術センター, "桜島の火山灰とシラスの違いについて", 鹿工技ニュース, No.68, 2015.
- [6] 栗島, "レーザーカオスを用いた THz 波の発生", レーザー研究, Vol.39, No. 7, pp.502-507, 2011.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
火山灰内における MHz および THz 帯伝送特性の解明に向けて	革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA2018)	2018 年 9 月
火山灰内における MHz 波および Sub-THz 波の伝送特性	レーザー学会第 526 回研究会	2018 年 12 月