

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04016

研究課題名(和文)超高分解能走査型ミリ波サーモグラフィーの開発とその応用に関する研究

研究課題名(英文)Development of ultra-high resolution near-field scanning millimeter-wave thermography and its applications

研究代表者

荻戸 立夫 (NOZOKIDO, TATSUO)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・准教授

研究者番号：00261149

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では電波であるミリ波を用いた新たな画像計測技術、超高分解能走査型ミリ波サーモグラフィーの開発を実施した。本技術は、走査型近接場顕微鏡技術とミリ波帯で培われている高感度信号計測技術を組み合わせることにより、物体から自然放出されているミリ波熱放射を計測して、回折限界を超える微小空間分解能での温度あるいは放射率分布計測を可能とするものである。本画像計測技術に関する総合的な開発を実施し、従来の熱画像計測装置として広く用いられている赤外線サーモグラフィーが動作困難な低温領域において放射率分布計測が可能であることを示す実験結果を得た。

研究成果の概要(英文)：Ultra-high resolution near-field scanning millimeter-wave thermography was developed to enable imaging of the temperature and/or emissivity distribution of a sample with a spatial resolution below the diffraction limit. This technique utilizes a sensitive radiometric receiver in combination with a scanning near-field microscope. Experiments were performed at a millimeter-wave frequency of 50 GHz for an aqueous solution of bovine serum albumin, which is a serum albumin protein derived from cows, in the low temperature range down to 125 K where passive imaging systems in the infrared region are ineffective. Our experiments show thermodynamics in the transition of structural states in protein as the transition in emissivity, indicating that imaging of the emissivity distribution is possible.

研究分野：ミリ波テラヘルツ波工学

キーワード：ミリ波 イメージング 走査型近接場顕微鏡技術 高空間分解能計測 熱放射計測 サーモグラフィー
画像再構成 応用計測

1. 研究開始当初の背景

ミリ波帯画像計測 (イメージング) 技術は、画像化対象である物体から熱的に放出されている熱雑音の内のミリ波成分を検出するパッシブ (放射計測) 方式を中心として、1980年代から研究開発が実施されている。ミリ波は霧、雲、煙、粉塵、火炎、衣類を透過するという、赤外、可視光では無効となる特長を有している。このため、航空管制、高度道路交通システムへの応用を始めとして、近年では、安心・安全 (セキュリティ) 用の技術としても注目されている。本ミリ波帯パッシブイメージングでは通常のカメラと同様の光学系が用いられているため、取得画像の空間分解能は観測波長 λ 程度に制限される。この限界を超える分解能での画像取得を可能とする方法が走査型近接場顕微鏡技術である。近年、光領域における走査型近接場顕微鏡技術の開発は飛躍的に進歩しており、既に実用の域に達していると考えられる。本技術は電波領域においても実現可能であり、電波領域で動作するシステムが実用化されれば光領域のシステムと同様に様々な分野への応用が展開されると期待され、現在、世界各国で研究開発が実施されている。

2. 研究の目的

研究代表者等は、走査型近接場顕微鏡用の新型高感度センサであるスリット型プローブを提案し、現在に至るまで主にミリ波帯での研究開発を実施してきた。スリット型プローブを用いた本ミリ波帯走査型近接場顕微鏡システムの開発は、発振器からのコヒーレントな波を画像化対象に照射するアクティブ方式で行ってきたが、パッシブ方式を用いれば微小領域を対象とする完全無侵襲計測というミリ波帯イメージング技術の新たな展開、応用の創出が可能になると考え本研究課題の着想に至り、開発を実施してきた。

本研究課題は、我々が既に実証したミリ波帯で動作するパッシブ方式のマイクロコピー、すなわちミリ波パッシブマイクロコピーを更に発展させ、微小空間分解能での無侵襲温度分布計測 (サーモグラフィ) あるいは放射率分布計測を、従来技術を上回る性能で実現する可能性を有する新たな画像計測技術、超高分解能走査型ミリ波サーモグラフィの開発を行うことを目的としている。

本研究で対象とする温度分布計測に関しては、従来技術の代表として赤外線サーモグラフィがある。赤外線サーモグラフィとミリ波サーモグラフィは共に物体から自然放出されている熱放射を検出する技術であるが、前者に対して後者は、低温領域における検出性能が周波数帯域幅を考慮しても格段に優れている。プランクの輻射則より、ミリ波帯における放射強度は極低温まで温度に比例して変化するのに対し、赤外領域では室温以下で放射強度が急激に低下する。従来の赤外線サーモグラフィがマイナス数十度以下で使用できないのは、この放射強度の低下によるものである。従って、ミリ波サーモグラフィは赤外線サーモグラフィが動作不可能な温度領域を補完できる可能性を有していることがわかる。

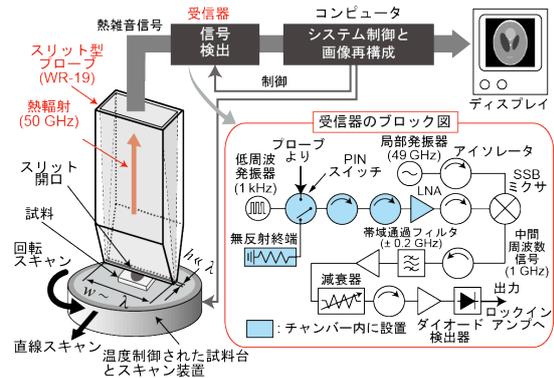


図1 超高分解能走査型ミリ波サーモグラフィの実験システム

3. 研究の方法

本研究で開発を実施する、超高分解能走査型ミリ波サーモグラフィを実現するための計測システムの概要を図1に示す。動作周波数はミリ波 50 GHz (波長: $\lambda = 6$ mm) である。測定対象である試料から放出された熱放射 (熱雑音信号) の内のミリ波成分を微小空間分解能で検出する近接場計測用プローブとしては、研究代表者等が提案したスリット型プローブを用いている。プローブで検出された熱雑音信号は、Dicke 型の高感度ヘテロダイン受信器で計測される。PIN スイッチでプローブと無反射終端を 1 kHz で交互に切り替え、ダイオード検出器からの出力変化分をロックインアンプで同期検出している。ロックインアンプからの出力は、システム制御および画像再構成を実施するコンピュータに取り込まれて画像化される。スリット型プローブは微小信号計測に適した高感度プローブであるが、先端部分に幅 (長方向寸法) w が波長程度 (4.8 mm)、高さ (短方向寸法) h が波長よりも十分小さいスリット状の開口を有している。本プローブで2次元画像を再構成するために、X線CTで代表される断層撮影技術で用いられているスキャン方法 (直線スキャンと回転スキャンの組み合わせ) と画像再構成法を採用している。本計測システムを用いて熱雑音信号を受信することにより、スリット開口の高さ h とほぼ等しい空間分解能での画像取得が可能であることを確認している。

本研究では、ミリ波サーモグラフィに関して、スリット型プローブの信号検出機構に関する理論解析、測定感度を改善するための新型スリットプローブの開発、画像計測時間の短縮に有効な新たな画像再構成法の開発、熱放射時間変化の画像化を可能とする新計測法の開発、タンパク質水溶液を対象とする応用計測等、基礎的検討から応用計測までを含む総合的な研究を実施した。

4. 研究成果

(1)スリット型プローブの理論解析

スリット型プローブの信号検出機構を明らかにするために、プローブの理論解析を実施した。図2に解析で対象としたテーパ型スリットプローブの構造(a)と、測定対象である試料の構造(b)を示す。ミリ波帯方形金属導波管 WR-19 (a : 4.8 mm、 b : 2.4 mm) の高さ方向寸法 b をテーパ状に減少させ、先

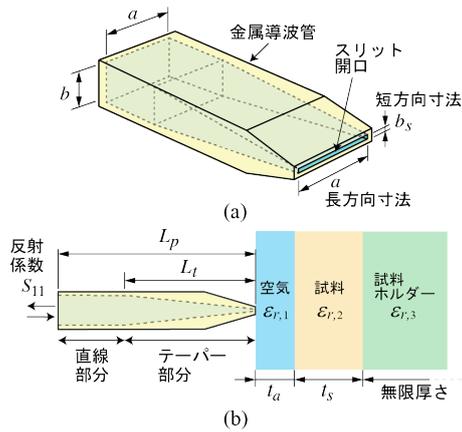


図2 スリット型プローブ(a)と試料の構造(b)

端に短方向寸法 b_s が波長より十分小さいスリット状の開口を形成している。試料はプローブ先端と試料表面までの空気層を含む3層構造を仮定した。試料を置く試料ホルダーは無限厚さとしたが、この条件は反射防止構造を用いることにより実験的にも満足することが可能である。

理論解析のためのモデルとしては、幅 a 、高さ b_s の金属導波管開口先端に、同じ寸法の開口を有する無限大の金属板を配置した構造を仮定した。解析領域を金属導波管内部である領域Ⅰと導波管外部の自由空間領域Ⅱに分割した。領域Ⅱにおける電磁界分布を波数領域のフーリエ積分で表し、領域Ⅰと領域Ⅱの境界面で電磁界を連続的に接続することにより領域Ⅱでの電磁界分布を計算した。本結果より開口から自由空間を見込んだアドミタンス、更には試料を見込んだアドミタンス Y_{tip} が求められる。導波管の特性インピーダンスを Z_w 、 Q を Y_{tip} と Z_w との積とすると、プローブ先端での反射係数 Γ は $\Gamma = (1-Q)/(1+Q)$ で計算できる。 Y_{tip} よりプローブの反射係数 S_{11} を等価回路演算により計算した。三次元電磁界シミュレータ Ansoft 社 HFSS による計算結果と上記方法による解析結果を比較したところ、両者が非常に良く一致することが確認できた。

プローブと試料との間隔を変化した場合の S_{11} を解析し、実験結果と比較した。結果を図3に示す。実験で使用したプローブの開口短方向寸法は $82 \mu\text{m}$ である。測定対象は石英とBK7であり、比誘電率はそれぞれ 3.80、6.19 である。実験結果と解析結果との良好一致を確認できた。本図より、 S_{11} の強度が極小になる間隔が存在すること、この極小は測定対象の誘電率が大きくなるほど顕著になることがわかる。この原因は、約 $100 \mu\text{m}$ 以下の近接場領域で間隔を大きくするにつれて、 Q の位相が遅れるためであることが解析結果より明らかとなった。比誘電率が大きいほど $|Q|$ は大きくなり、 $|Q|$ が大きいほど位相遅れは大きくなる。位相遅れが大きいほど $|\Gamma|$ の減少が大きくなるため図の極小が発生している。 Q の実数部は波数の小さい空間周波数成分で決まるのに対して、虚数部は波数の大きいエバネッセント波成分の影響が大きいことが解析よりわかった。間隔を近接場領域で大きくすると、波数の大きいエバネッセント波成分の影響すなわち虚数部が急激に小

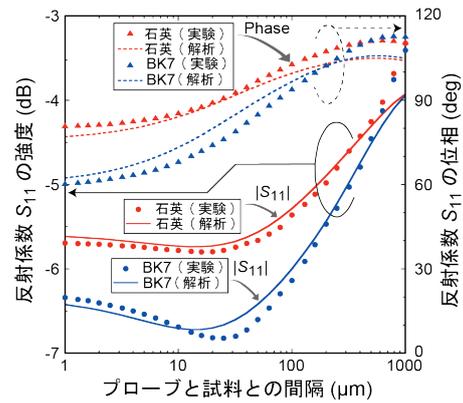


図3 プローブ・試料間隔を変化した場合の反射係数 S_{11} の強度 ($|S_{11}|$) と位相 (Phase) の変化 (解析結果と実験結果との比較)

さくなるため上記の位相遅れが発生していることが明らかとなった。

(2) スタブ整合器を有する新型スリットプローブの開発

高感度高分解能計測を実現するための最も重要なシステム構成要素がプローブである。従来、高感度すなわち高透過率、高分解能特性をあわせて実現するために、異方性エッチング等の半導体プロセスを利用して製作したシリコン製の金メッキ付チップ (シリコン製チップ) を、テーパ型スリットプローブの先端に装着して使用していた。シリコン製チップは整合回路としても動作するが、高感度計測を実現するためには測定対象の物性に依ってチップを製作し、プローブに装着し直す必要があった。本研究ではこの問題を解決するために、スタブ整合器を有する新型スリットプローブの開発を実施した。

図4に開発したスタブチューナー付スリット型プローブの写真(a)と導波管の断面構造(b)を示す。50 GHz での動作を想定し、より小型化を図るために、ステップ状、4 段のテーパ構造を採用した。3 本のスタブチューナーを用いることにより、様々な測定対象に適用可能なプローブの実現を目指した。

図5に開発したプローブの特性評価結果を示す。図1の実験システムにおいて、測定対象である試料としては電波吸収材料 (TDK 社 エポアイアン) を用いた。電波吸収材料の温度を変化させてロックインアンプの出力電圧を測定した。開発したプローブにはシリコン製チップが装着されており、開口の寸法は長方向、短方向がそれぞれ 4.5 mm 、 $25 \mu\text{m}$ である。比較として従来使用していたテーパ型スリットプローブでも計測を実施した。本プローブはシリコン製チップを装着しておらず、開口の寸法は長方向、短方向がそれぞれ 4.8 mm 、 $100 \mu\text{m}$ である。Yファクター法を用いてそれぞれのプローブを用いた場合のシステム雑音温度を計算し、温度分解能を求めた。その結果、温度分解能として、テーパ型スリットプローブ、スタブチューナー付スリット型プローブそれぞれの場合、 1.09 K 、 0.32 K の値を得た。従来と比較して温度分解能を約 $1/3$ に改善することに成功した。

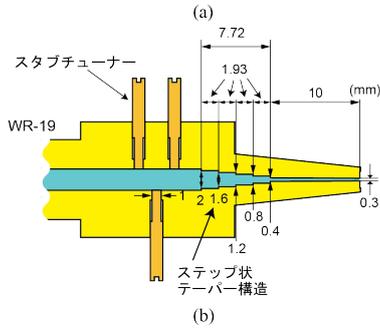
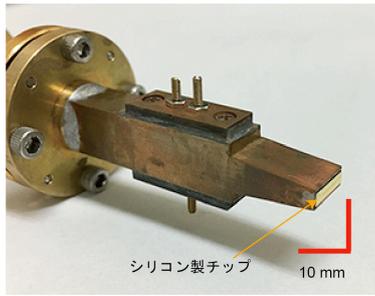


図4 スタブ整合器を有する新型スリットプローブの写真(a)とその断面構造(b)

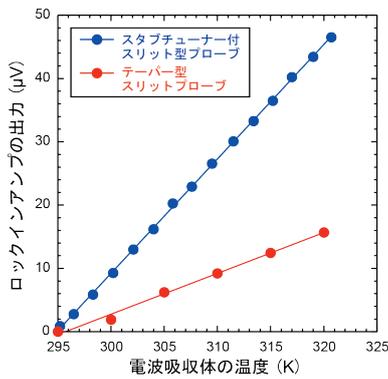


図5 プローブの性能評価

(3) 圧縮センシング法を用いた画像再構成法の開発

ミリ波サーモグラフィーで二次元画像を取得するためには、前述のように X 線 CT で代表される断層撮影技術で用いられているスキャン方法と画像再構成法を使用する必要がある。スキャン方法は、プローブをスキャンする場合について説明すると、プローブを1点ずつ直線スキャンしながら N_s 個のデータを計測して1つの投影データを取得、次に試料を小角度回転して同様の直線スキャンをするという操作を角度 180° まで繰り返している。従って画像再構成に必要な投影データ数すなわち直線スキャンの回数が少なく済めば、測定時間の短縮が可能である。本研究では、X 線 CT の分野で低被爆化を目的に開発が実施されているスパースビューCT で注目されている、圧縮センシングによる画像再構成法に関する検討を実施した。

圧縮センシングの中で最も広く採用されているトータルバリエーション最小化による画像再構成法の開発を実施した。シミュレーションで得られた再構成画像を図6に示す。原画像を N_s が 256 点、投影データ数を

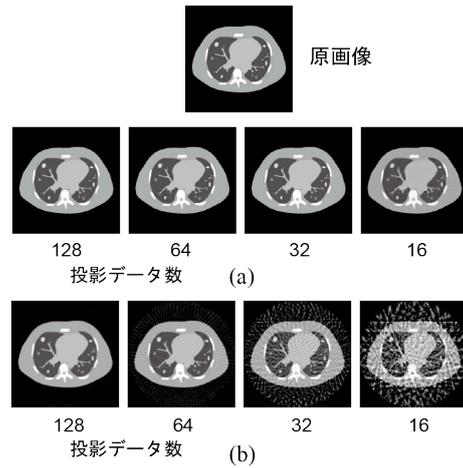


図6 トータルバリエーション最小化による再構成画像(a)と従来のフィルター補正逆投影法による再構成画像(b)

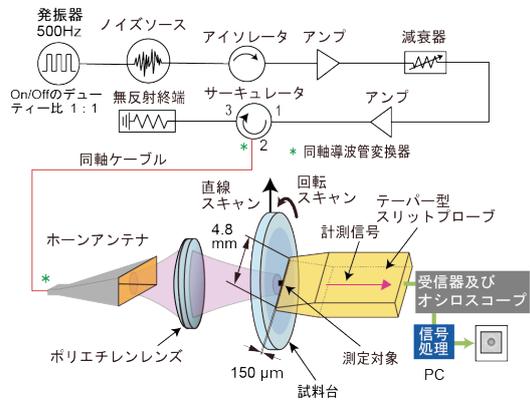


図7 熱放射時間変化の画像化

128、64、32、16 で画像化データを生成した場合の再構成画像を、トータルバリエーション最小化による場合(a)と従来用いていたフィルター補正逆投影法の場合(b)を比較して表示している。本結果よりトータルバリエーション最小化による画像再構成の場合、投影データ数が 32、16 でも原画像とほぼ同様の再構成画像が得られていることがわかる。これに対してフィルター補正逆投影法の場合は、投影データ数が 32、16 と少なくなるとアーティファクトが顕著になっている。本結果は、トータルバリエーション最小化による画像再構成法により従来と比較して測定時間を $32/128 = 1/4$ 程度以下に低減できる可能性を示している。

(4) 熱放射時間変化の計測

ミリ波サーモグラフィーにおける新たな計測方法を開発する目的で、熱放射分布の時間変化を画像化するための基礎検討を実施した。実験システムを図7に示す。プローブとしては(2)で説明した従来使用していたテーパ型スリットプローブを用いた。インコヒーレントな熱放射信号を受信して時間変化が画像化可能かどうかを確認するために、デューティ比 1 : 1 で On/Off されたノイズソースからのインコヒーレントな信号を測定

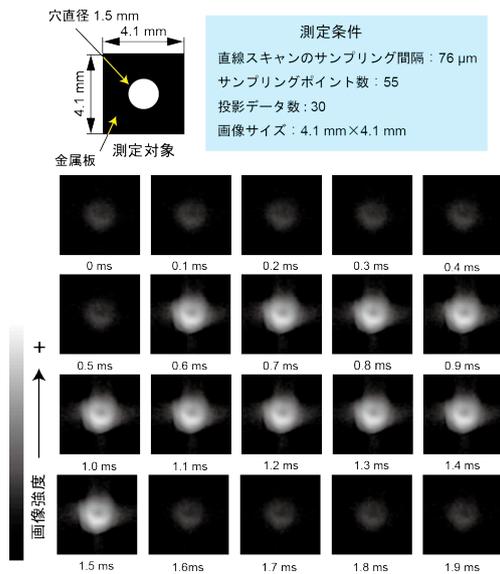


図8 再構成画像

対象に照射して画像化を実施した。ノイズソースからの信号は 500 Hz の繰り返し信号なので、各スキャン点で受信器からの信号の時間変化をオシロスコープで計測することにより、時間変化を表す画像群の再構成が可能であると考えられる。

画像再構成結果を図8に示す。0.1 ミリ秒毎の画像である。測定対象は図に示した金属板であり、中心に直径 1.5 mm の穴が空いている。照射されたインコヒーレントな雑音状信号の偏波方向は金属面に平行である。金属板の穴の直径は波長より小さいため、金属板は円形のカットオフ導波管として動作する。この場合、穴の中心部分の電界方向は板面に垂直方向であることが知られている。スリット型プローブは金属板に平行な方向の電界成分のみを検出するため、得られる画像は、穴の中心部分の画像強度が小さいドーナツ状になることが予想される。図8の実験結果より、穴の部分の電界分布を正確に反映した画像が得られていることが確認できた。

(5) タンパク質水溶液を対象とする低温領域における熱放射計測

ミリ波サーモグラフィによる新たな熱分析技術を開発することを目的として、タンパク質 (BSA: bovine serum albumin、ウシ血清アルブミン) 水溶液を測定対象として、270 K (-3 °C) から 130 K (-143 °C) の低温状態での熱放射計測を試みた。プローブとしてはステップ状テーパ構造を有するスリット型プローブを用いた。スリット開口の寸法は長方向、短方向がそれぞれ、4.8 mm、150 μm である。アルミ製容器に試料を入れ、溶液試料表面にポリ塩化ビニリデンフィルムを敷いた後にプローブを配置した。プローブ先端とフィルムとの間隔は低温状態で 20 μm に保たれている。

固体の水 (氷) のミリ波帯での放射は無視できるので、本計測によりタンパク質からの情報を選択的に取得できると考えられる。更に凍結することによりランダムなブラウン運動の影響を受けない、固定、すなわち、ある状態にトラップされたタンパク質の立体

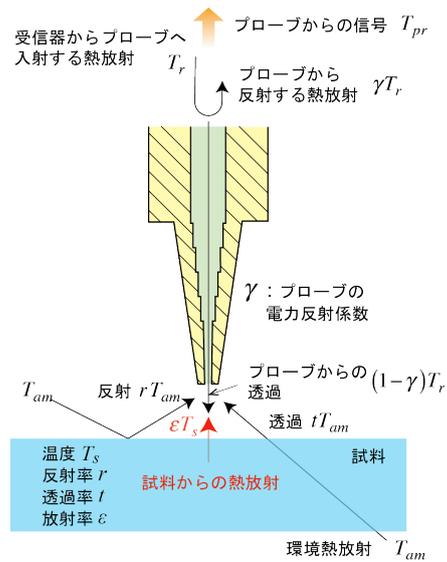


図9 熱放射 (熱雑音信号) の解析モデル

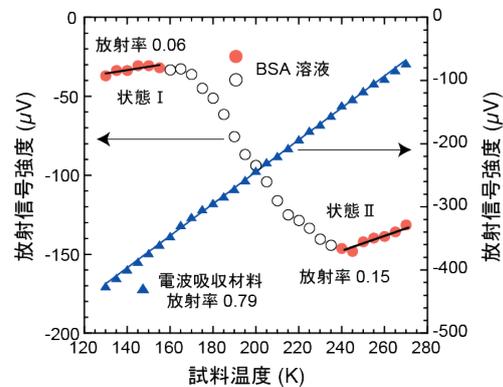


図10 信号処理を施した計測信号の比較

構造に由来する情報を計測できる可能性があると考えている。

計測された生データより有意な情報を抽出するために、プローブによる信号検出の機構に関する検討を実施した。図9に熱放射 (熱雑音信号) の解析モデルを示す。プローブから検出される信号は次の3つの信号成分から構成される。受信器からプローブへ入射して反射される熱雑音信号、試料から放射されて検出される熱雑音信号、そして、試料表面で反射、試料を透過して検出される環境熱雑音信号。これらはすべてプローブの電力反射係数 γ に依存するため、 γ を測定対象ごとに測定してその影響を除去する必要がある。ロックインアンプからの出力信号を解析することにより、 γ の影響 (測定感度の差異) を除去するには出力信号を $1-\gamma$ で除算すれば良いことを明らかにした。試料だけでなく放射がない固体の水 (氷) の測定を実施することにより、環境熱放射の影響を抽出できることがわかった。

以上の検討より、測定で得られた一連の信号を処理することにより、最終的に $\epsilon(T_s - T_{am})$ に比例する出力が得られる見込みを得た。ここで ϵ 、 T_s 、 T_{am} はそれぞれ、試料の放射率、試料温度、環境熱放射温度である。上式は、 T_{am} が T_s に係わらず一定あるいは T_s に比例す

れば、 T_g に対する出力の傾きが試料の放射率 ϵ の推定値を与えることを示している。

図10に、濃度20%のBSA溶液及び放射率が既知の電波吸収材料を測定対象として得られた信号を、上記方法によって処理した結果を示す。BSA溶液の測定結果では2つの状態間の温度による遷移を観測することに成功した。更にBSA溶液の結果で、試料温度に対する信号強度の変化の傾きを電波吸収材料の傾きと比較することにより、それぞれの状態の放射率が決定できることを明らかにした。本結果は、二次元画像の取得を実施すれば測定対象の放射率分布画像化が可能であることを示す重要な成果である。

以上(1)から(5)記載の成果は、超高分解能走査型ミリ波サーモグラフィ、更にはミリ波帯における高分解能画像計測技術の実用化に寄与するところが大きく、未だ十分でないミリ波帯電磁波の有効利用を促進し得るものと考えている。

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5件)

① T. Nozokido, M. Ishino, R. Seto, and J. Bae, Contrast analysis of near-field scanning microscopy using a metal slit probe at millimeter wavelengths, Journal of Applied Physics, 査読有, vol. 118, no. 12, pp. 114905-1-8, 2015

② 裴鐘石, 荻戸立夫, 遠藤政男, 兪熊斌, テラヘルツ波の食品異物検査への応用、精密工学会誌、査読無、vol. 82, no. 3, pp. 235-238, 2016

③ 伊東良太、本間道則、荻戸立夫、能勢敏明、連続発振テラヘルツ波を用いた液晶デバイスの評価、日本液晶学会誌、査読無、vol. 20, no. 2, pp. 103-108, 2016

④ 裴鐘石, 荻戸立夫, 遠藤政男, 石橋忠夫, 清水誠, 草薙都巳、食品異物検査用テラヘルツイメージング装置の開発、OplusE, 査読無、vol. 38, no. 12, pp. 1142 - 1145, 2016

⑤ 裴鐘石, 荻戸立夫, 遠藤政男, 石橋忠夫, 清水誠, 草薙都巳、食品異物検査用0.1THz帯テラヘルツイメージング装置の開発、クリーンテクノロジー、査読無、vol. 27, no. 7, pp. 54-58, 2017

[学会発表] (計7件)

① X. Yu, M. Endo, T. Ishibashi, M. Shimizu, S. Kusanagi, T. Nozokido, and J. Bae, Orthogonally polarized terahertz wave imaging with real-time capability for food inspection, Proc. Asia-Pacific Microwave Conference 2015, Paper No. WE-1B-5 (3 pages)

② 伊東良太、高山和久、本間道則、斗内政吉、荻戸立夫、能勢敏明、液晶デバイスを用いたテラヘルツ波偏光計測法の検討、2015年日本液晶学会講演会・討論会、2015、講演番号3C11

③ 兪熊斌、荻戸立夫、遠藤政男、裴鐘石、偏波独立型0.3THz高速テラヘルツイメージ

ング、第63回応用物理学会春季学術講演会、2016、講演番号22a-H135-3

④ 山浦 悠史、兪熊斌、裴鐘石、荻戸立夫、0.1THz帯雑音源を用いたテラヘルツイメージング、第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016、講演番号16a-B2-6

⑤ T. Nozokido, M. Ishino, and J. Bae, Contrast of near-field scanning millimeter-wave microscopy using a metal slit probe, Proc. 41st International Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves IRMMW-THz 2016, Paper No. M5P.10.3

⑥ A. Kishigami and T. Nozokido, Measurement of protein conformational fluctuation in ice by passive millimeter-wave microscopy, to be presented at 43rd International Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves, 2018

⑦ D. Takehara, M. Endo, T. Ishibashi, M. Shimizu, S. Kusanagi, T. Nozokido, and J. Bae, Dual-polarization imaging with real-time capability using a terahertz noise source for food inspection, to be presented at 43rd International Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves, 2018

[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

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荻戸 立夫 (NOZOKIDO TATSUO)
富山大学・大学院理工学研究部 (工学)・
准教授
研究者番号：00261149

(2) 研究分担者

工藤 博幸 (KUDO HIROYUKI)
筑波大学・システム情報工学研究科・教授
研究者番号：60221933

ベイ ジョンソク (BAE JONGSUCK)
名古屋工業大学・工学 (系) 研究科 (研
究院)・教授
研究者番号：20165525

岸上 明生 (KISHIGAMI AKIO)
岐阜女子大学・家政学部・教授
研究者番号：40261177

(3) 連携研究者

該当なし

(4) 研究協力者

該当なし