

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01450

研究課題名(和文)ミリ波マイクロスコピーの実用化に関する研究

研究課題名(英文)Practical realization of millimeter-wave microscopy

研究代表者

荻戸 立夫 (Nozokido, Tatsuo)

富山大学・学術研究部工学系・准教授

研究者番号：00261149

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：走査型近接場顕微鏡技術(マイクロスコピー)の開発をミリ波帯で実施した。本技術すなわちミリ波マイクロスコピーでは、通常の光学系を用いたイメージング装置で達成可能な空間分解能を遙かに上回る性能で画像化が可能である。ミリ波マイクロスコピーの有用性を実証するために、ミリ波帯電磁波の特長を活かした2つのキラアプリケーションを新たに提案した。各種材料を測定対象とするアクティブ、パッシブ両方式に関する総合的な開発を実施することにより、本技術の実用化に資する成果を得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミリ波マイクロスコピーによる生体タンパク質の観察と、鋳鉄材料の画像化を実施した。前者では、低温状態におけるタンパク質の構造変化を、従来検討されていなかった新たな物理パラメータである放射率の変化として観察することに成功し、後者では鋳鉄材料内の炭素形状の画像化に成功した。以上はミリ波マイクロスコピーの特長を活かした従来例を見ない我々独自の成果であり、本成果は、ミリ波の生物学、基礎医学、金属材料の特性解析・評価への適用といった新たなフロンティア画像計測領域を開拓し、更に未だ十分に利用されていないミリ波帯電磁波資源の有効利用を促進することも可能と考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed an imaging technique of scanning near-field microscopy in the millimeter-wave region. This microscopy format can achieve superior spatial resolution than that obtainable in conventional imaging systems using normal optics. In order to demonstrate the feasibility of this technique, that is, millimeter-wave microscopy, we proposed two new killer applications that take advantage of the features of the millimeter-wave radiation. We have made important achievements that can contribute to the practical realization of this technique by carrying out comprehensive examination of both active and passive methods for measuring various materials.

研究分野：ミリ波テラヘルツ波工学

キーワード：ミリ波 走査型プローブ顕微鏡 熱放射計測 高分解能計測 画像再構成 応用計測 タンパク質 鋳鉄

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電磁波の応用は、通信、計測、エネルギー伝送に大別できる。図1に示すイメージングすなわち画像計測技術は、電磁波の計測応用における重要な一分野であり、電波の低周波数領域ではMRI、レーダー、光領域では赤外線カメラ、デジタルカメラ、X線領域ではCT等が開発されている。以上のように電磁波スペクトルの幅広い領域でイメージング技術が実用化されているにもかかわらず、通常電波と呼ばれる領域と光領域の中間に位置するミリ波、テラヘルツ波帯では、イメージング技術の開発は遅れをとっているのが現状である。



図1 電磁波スペクトルとイメージング技術

図2にミリ波、テラヘルツ波帯におけるイメージング技術の分類を示す。ミリ波、テラヘルツ波帯におけるイメージング装置は、発振器の有無によって、発振器からの波を測定対象に照射して画像化を行うアクティブ方式と、測定対象から自然放出されている熱雑音信号を受信するパッシブ(放射計測)方式とに分類できる。一方、像を構成する結像系の観点から分類すると、通常のカメラの構成を有するフォーカルプレーン方式と、走査型近接場顕微鏡方式とに分類できる。前者では空間分解能は回折現象により観測波長程度に制限されるが、後者では回折限界をはるかに超える微小空間分解能での画像取得が可能である。現在ミリ波、テラヘルツ波帯のイメージング技術の開発はフォーカルプレーン方式を中心に、安心・安全(セキュリティ)への取り組みとして、空港等に設置されているボディスキャナー、食品異物検査装置等が開発されている。

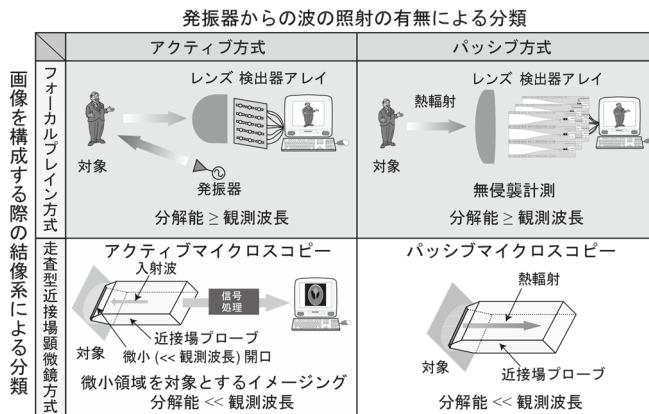


図2 ミリ波テラヘルツ波帯におけるイメージング技術の分類

走査型近接場顕微鏡技術は1990年代から主に光領域で研究開発が行われ、光領域では既に実用の域に達していると考えられる。本技術は動作原理上、ミリ波、テラヘルツ波帯でも実現可能であり、本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。テラヘルツ波帯では、テラヘルツ波が物質との相互作用が大きく物質固有の指紋スペクトルが観測されていることから、本技術の分光分析への実用化展開が期待されている。しかしながら、本技術のミリ波帯での実用化は十分に検討されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、電波であるミリ波帯で動作する走査型近接場顕微鏡技術、ミリ波マイクロスコピ

一の開発を実施する。近接場センサとして、超高感度計測が可能なスリット型プローブ及び超高分解能計測が可能な同軸線路型プローブを用いた計測システムを構築する。スリット型プローブを用いたシステムは測定対象からのミリ波放射を計測するパッシブモードで動作させ、新規分析法の開発を目指して、生体タンパク質を測定対象とする。同軸線路型プローブを用いるシステムは、発振器からの波を測定対象に照射するアクティブモードで動作させ、新規評価法の開発を目指して、鋳鉄材料の計測を実施する。これらの計測はミリ波マイクロスコープの特長を活かしたキラーアプリケーションとして新たに提案するものである。本研究では、以上の開発によりミリ波マイクロスコープの有用性を実証し、その実用化に資することを目的としている。

3. 研究の方法

図3に開発を実施した計測システムの概要を示す。図4はスリット型プローブを用いたシステムの写真で、左図は計測システムの全景、右図はサンプルマウントの部分を拡大して表示している。スリット型プローブは、先端に、幅 w が波長 λ 程度、高さ h が λ よりも十分小さいスリット状の開口を有している。このため、高さ h を小さくしても伝搬波の遮断が起こらないので、開口からの透過波効率すなわち感度をきわめて高くできるという優れた特長を持っている。幅 w 方向の情報を分解した、高さ h と同等の空間分解能を有する二次元画像を得るために、CTで用いられている図3のスキャン方法及び画像再構成法を採用している。

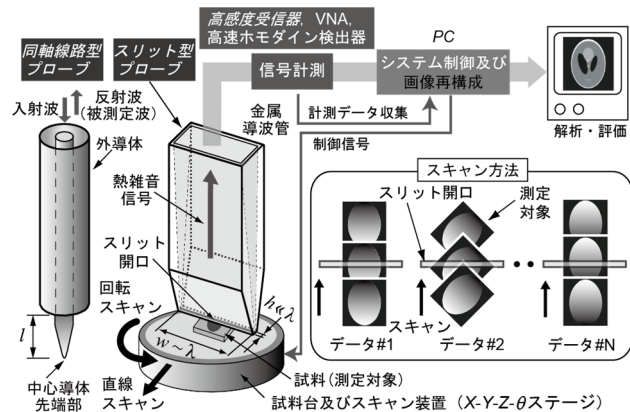


図3 計測システム

金属導波管先端に半導体 MEMS プロセス、FIB 加工装置を用いて製作した微小スリット開口を有する金メッキ付シリコン製チップを装着して、高分解能での画像取得を目指した。本チップは整合回路としても動作し、測定感度の向上にも有効である。チップ構造の設計は、有限要素法による三次元電磁界解析シミュレータ HFSS を用いて実施した。プローブで受信した微小熱雑音信号をディック型高感度ヘテロダイン受信器で検出し、温度に対する熱放射分布を現す画像の再構成を試みた。画像再構成に関して本研究では、従来数時間を要していた画像計測時間を大幅に短縮するために、少数のデータでも空間分解能を損なうことなく画像再構成が可能な、圧縮センシング技術を用いた画像再構成法の実装を実施した。スキャン系、低温測定用のチャンバーを改造することにより、液体窒素により近い温度から室温までの幅広い温度領域における測定を可能とする計測システムの改善を実施した。

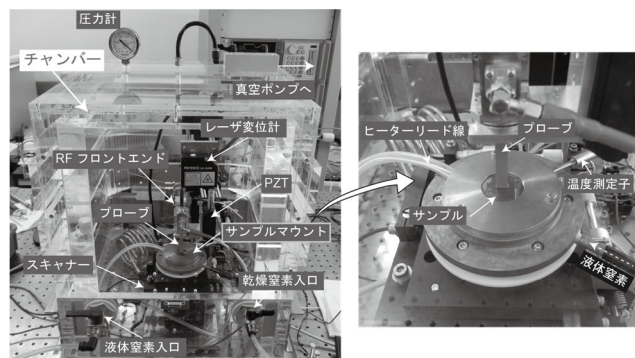


図4 計測システムの写真

測定対象としては、血漿中で最も豊富なタンパク質であるウシ血清アルブミン (BSA : Bovine Serum Albumin) 水溶液を選択し、冷却、凍結した固体状態で、温度を変化した場合の放射信号計

測及び画像化を実施した。

同軸線路型プローブは点型センサなので、図3のシステムにおいてラスタースキャンを行えば二次元画像の取得が可能である。アクティブ計測を実施するために、ベクトル・ネットワーク・アナライザ（VNA）を信号計測装置として使用した。チューブ形状の中心導体を有するセミリジッド同軸ケーブルをプローブとして用いた。タングステン細線を電解エッチングによって先鋭化し、金メッキを施した後にチューブ穴に挿入して同軸線路型プローブを製作した。図3において、同軸線路端から中心導体（タングステン線）先端部までの長さ l が測定感度を決定する重要なパラメータと考えられる。本研究では、上記シリコン製チップの場合と同様に HFSS により長さ l を最適化した。中心導体先端の曲率半径程度の空間分解能での画像取得が可能である。測定対象である鋳鉄内の黒鉛形状を考慮して、上記金メッキにより曲率半径 $10\mu\text{m}$ の先端を形成した。

4. 研究成果

スリット型プローブを用いたミリ波パッシブパッシブマイクロスコープによるタンパク質水溶液の観察結果を図5に示す。測定周波数帯は $50\pm 0.5\text{GHz}$ である。体積 0.9mL の 10% BSA 水溶液を凍結し、温度を 130K から 270K まで変化させた場合の放射信号強度の変化を示している。本放射信号強度は、測定された生データから、プローブでの反射の影響及び周囲の室温程度の環境雑音の影響を除去した結果である。水を凍結した氷からのミリ波放射は無視できるので、本実験ではタンパク質固有の放射信号を計測できたと考えている。比較のために電波吸収材料の測定結果も示した。BSA の測定結果では、温度変化による2つの状態間の構造変化を観測することに成功した。更に、電波吸収材料の結果の傾きとの比較で、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。

図6に画像化実験の結果を示す。電波吸収セラミックス製のサンプルホルダーを製作し、4つのウェルに異なる濃度のBSA水溶液（体積 $1.6\mu\text{L}$ ）を注入し、温度を 223K から 253K まで変化してウェル部分の画像取得を実施した。再構成画像（画像化範囲： $6\text{mm}\times 6\text{mm}$ ）より、各ウェルに対応する画像強度を試料温度に対してプロットし、これら直線の傾きより各 BSA 水溶液の放射率を明らかにす

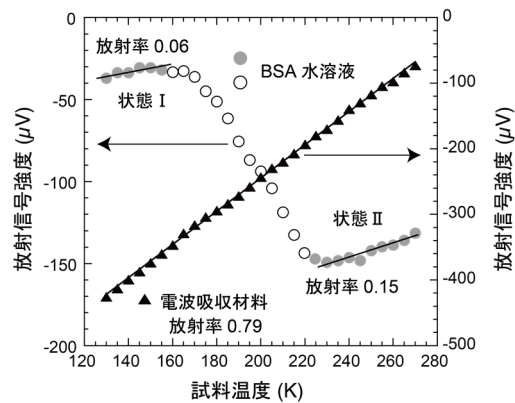


図5 試料温度に対する信号強度の変化

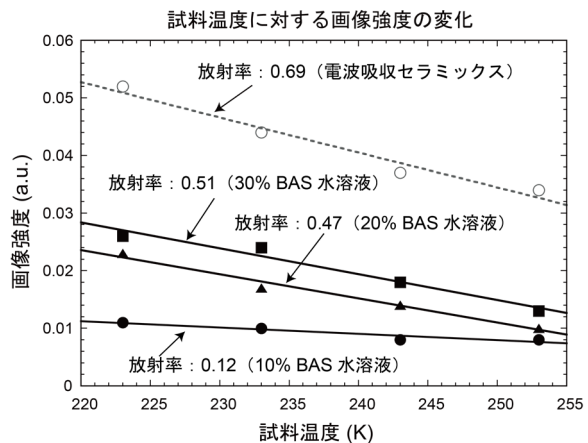
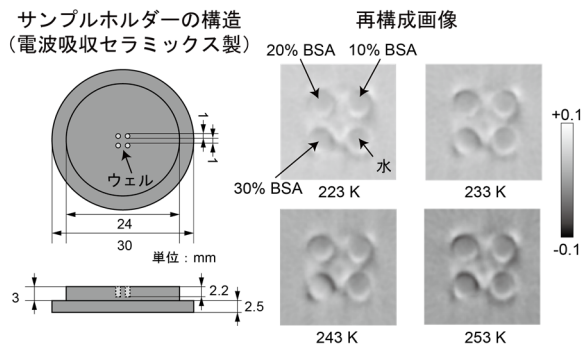


図6 画像化実験の結果

ることに成功した。図6のグラフで、試料温度に対する画像強度変化の傾きが図5の2つの状態の部分の傾きと異なって負になっているのは、サンプルホルダーの底部ほど表面より温度が低いので、水に対応する画像強度から決定する環境雑音がBSA水溶液及び電波吸収セラミックス表面からの放射よりも小さいことによるものである。理論検討により、傾きが負になっても、放射率が既知の材料との傾きを比較することより、放射率が決定できることを明らかにしている。

画像再構成に関しては、圧縮センシング技術を用いた画像再構成法を開発した。シミュレーションの段階ではあるが、従来と比較して1/8程度の測定時間で画像計測が可能であるとの見込を得た。空間分解能に関しては、現在までに約 $3\mu\text{m}$ を達成している。

今後は、更なる高分解能化を実現して細胞を対象とする画像計測を実施することを計画している。本研究により、温度に対する細胞の放射率分布を示す画像群が得られる可能性がある。放射率は吸収率に等しいので、測定周波数を変化させることにより、吸収スペクトル分布に関する情報を取得することが可能と考えている。本研究で吸収（放射）スペクトルが実験的に観測されれば、未だ十分に解明されていないタンパク質の立体構造解析への寄与が期待できると考えている。

同軸線路型プローブを用いたミリ波アクティブマイクロコピーに関しては、鏡面研磨された平坦な鋳鉄材料を対象として、先端と試料間の間隔は制御せずに画像取得を実施した。HFSSによる計算結果より、同軸線路端から中心導体先端部までの長さ l がより短いほど導電率変化に対する測定感度が大きいことを明らかにしている。測定対象である鋳鉄材料の鏡面研磨面の光学顕微鏡写真とミリ波画像を図7に示す。測定周波数は40GHzである。ミリ波画像では、球状黒鉛の分布が、 Q 値が高い白点として良好なコントラストで画像化されている。片状黒鉛が画像上で現われていないのは、片状黒鉛の幅($\sim 5\mu\text{m}$)を認識できない空間分解能($\sim 20\mu\text{m}$)で画像を取得したためであると考えている。

今後は、プローブ中心導体先端と鋳鉄材料表面までの間隔を一定に保ち、切削面の凹凸に沿うスキャンを実現するために、プローブの共振周波数 f_0 を一定保つ方法を検討する予定である。チューナーを用いてプローブを共振無反射状態で動作させる。プローブ先端から測定対象を見た電気的インピーダンスは、中心導体先端と鋳鉄間の容量 C と、鋳鉄の導電率で決まる抵抗 R の直列回路で表される。間隔によって C 、 C によって f_0 が決まるので、 f_0 を一定に保てば上記スキャンが実現できると考えている。

従来、鋳鉄の黒鉛形状を評価するためには、光学顕微鏡による観察手法が用いられている。鋳造された鋳物の表面を切削後、ほぼ1日をかけて鏡面研磨した後に光学顕微鏡を用いて観察を実施している状況である。本研究により例えば、鋳造後、シリンダー部を切削加工で形成したエンジン部品を対象として、シリンダー内面をミリ波アクティブマイクロコピーで直接計測して鋳鉄の黒鉛形状、材質を評価することができれば、従来の抜き取り検査ではなく、すべての製品を対象とする検査を実施できる可能性があると考えている。

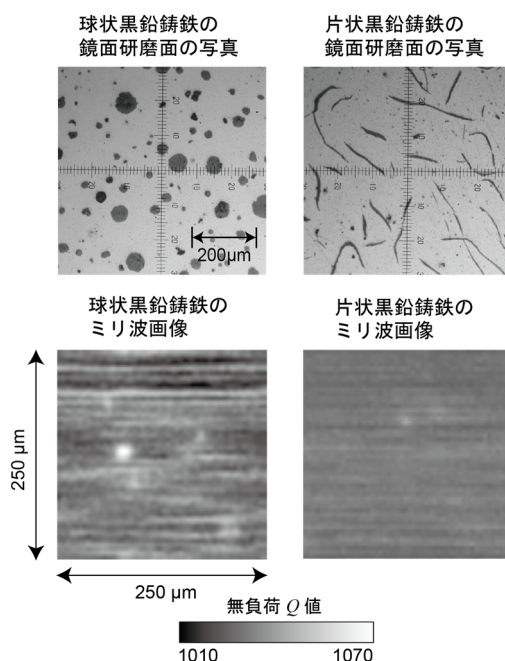


図7 鋳鉄の光学顕微鏡及びミリ波画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ishino Manabu, Nakamura Shun-ichi, Nozokido Tatsuo	4. 巻 42
2. 論文標題 Sensitive Near-Field Slit Probe with High Spatial Resolution for Passive Millimeter-Wave Microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 416 ~ 425
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10762-021-00777-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Ishino, A. Kishigami, H. Kudo, J. Bae, and T. Nozokido	4. 巻 40
2. 論文標題 Observation of protein thermodynamics in ice by passive millimeter-wave microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves	6. 最初と最後の頁 585-594
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10762-019-00585-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 T. Nozokido, Y. Takakura, and A. Kishigami
2. 発表標題 Passive millimeter-wave microscopy of aqueous protein solutions at low temperatures
3. 学会等名 44th International Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves IRMMW-THz 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Nozokido, H. Okano, and H. Kudo
2. 発表標題 Compressed sensing image reconstruction for millimeter-wave near-field scanning microscopy using a metal slit probe
3. 学会等名 44th International Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves IRMMW-THz 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Kishigami, H. Kudo, J. Bae, and T. Nozokido
2. 発表標題 Millimeter waves tell heat from a cold protein
3. 学会等名 Advances in Engineering (https://advanceseng.com/millimeter-waves-tell-heat-cold-protein/)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Kishigami, T. Nozokido
2. 発表標題 Measurement of protein conformational fluctuation in ice by passive millimeter-wave microscopy
3. 学会等名 43rd International Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves IRMMW-THz 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Takehara, M. Endo, T. Ishibashi, M. Shimizu, S. Kusanagi, T. Nozokido, J. Bae
2. 発表標題 Dual-Polarization Imaging with Real-Time Capability Using a Terahertz Noise Source for Food Inspection
3. 学会等名 43rd International Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves IRMMW-THz 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 裴鐘石, 苅戸立夫, 遠藤政男, 石橋忠夫, 清水誠, 草薙都巳	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 8
3. 書名 異物分析, 第2章 第9節 テラヘルツイメージングによる食品中の異物分析	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岸上 明生 (Kishigami Akio) (40261177)	岐阜女子大学・家政学部・教授 (33702)	
研究分担者	工藤 博幸 (Kudo Hiroyuki) (60221933)	筑波大学・システム情報系・教授 (12102)	
研究分担者	ベイ ジョンソク (Bae Jongsuck) (20165525)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (13903)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関