

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月22日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360162

研究課題名（和文）ミリ波帯パッシブマイクロスコピーの開発

研究課題名（英文）Development of passive millimeter-wave microscopy

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

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、ミリ波帯パッシブマイクロスコピーに関する検討を実施した。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分解能での画像化を可能とするものである。画像計測システムを構築、本システムの特性評価を実施すると共に、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が動作困難な低温領域における熱画像取得に成功した。

研究成果の概要（英文）：In this research project, passive millimeter-wave microscopy that enables imaging of the thermal radiation emitted from a sample with a spatial resolution below the diffraction limit is investigated to demonstrate the imaging capability of this microscopy format at low temperatures. This technique utilizes a sensitive radiometric receiver in combination with a scanning near-field microscope. Experiments performed at 50 GHz (wavelength: 6 mm) at various sample temperatures show that our passive millimeter-wave microscope system can successfully image thermal radiation even in the low temperature range where passive imaging systems in the infrared region are ineffective.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2011年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2012年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：ミリ波、マイクロスコピー、走査型近接場顕微鏡技術、パッシブ計測、無侵襲計測、熱画像計測、低温

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自然放出されている熱放射の内のミリ波成分を検出するパッシブ方式を中心として、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。この限界を超える空間分解能での画像取得を可能とする技術が走査型近接場顕微鏡技術（マイクロコピー）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。

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ー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った。

2. 研究の目的

本研究は、電波であるミリ波を用いた新たな画像計測技術、ミリ波帯パッシブマイクロコピーの開発を実施することを目的としている。研究代表者等が提案し研究・開発を実施しているミリ波帯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、回折限界をはるかに超える微小空間分解能での熱画像取得を実証する。ミリ波帯パッシブマイクロコピーを実現するための計測システムを構築し本システムの特性評価を実施すると共に、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が動作困難な低温領域における熱画像取得を検討し、ミリ波帯パッシブマイクロコピーの有用性を実証することを計画した。

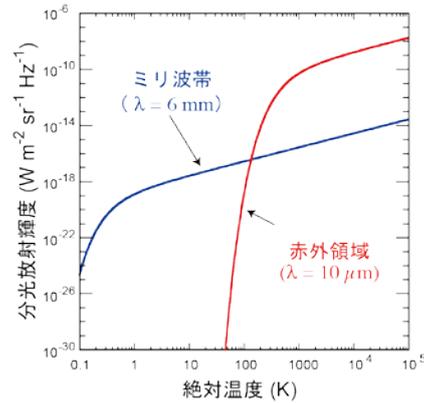


図1 赤外、ミリ波領域における放射強度

本研究で対象とする熱画像計測に関しては、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帯パッシブマイクロコピー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。図1は、プランクの法則より計算した分光放射輝度を温度に対してプロットした結果である。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している。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、ミリ波帯パッシブマイクロコピーは赤外線サーモグラフィの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。

3. 研究の方法

本研究で開発を実施する、ミリ波帯パッシブマイクロコピーを実現するための計測システムの概要を図2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型動作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 w が波長程度（4.8 mm）、高さ h が波長よりも十分小さい（100 μ m）

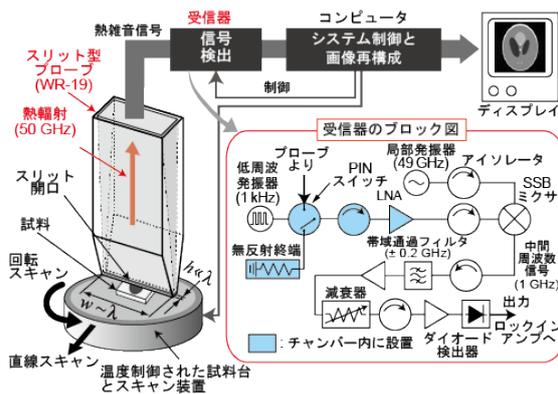


図2 ミリ波帯パッシブマイクロコピーの計測システム

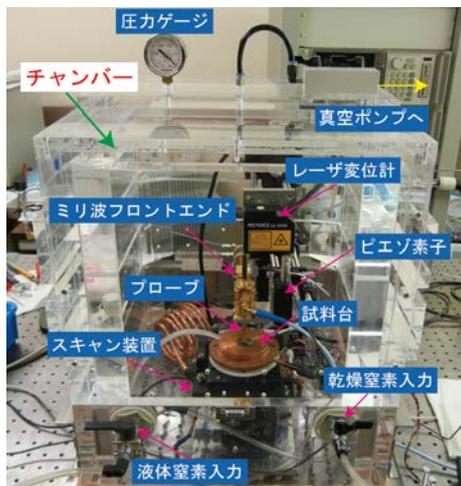


図3 製作した実験システム

スリット状の開口を有している。本プローブで二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二次元画像取得が可能であることを確認している。

図3は、製作を実施した計測システムの写真である。低温での測定を可能とするために、試料等表面に発生する霜を防ぐ目的で、システムは真空対応のチャンバー内に設置した。

4. 研究成果

(1) 低温領域での熱画像取得

図4(a)、(b)に、低温領域での熱画像取得を実証するために用いた試料の構造を示す。直径30mm、厚さ2.5mmの電波吸収材料基板に、直径1mm、深さ1.5mmの穴を空けたものである。図4(c)は、本試料を測定対象として、プローブを直線スキャンした際のロックインアンプからの出力信号強度の変化を示し

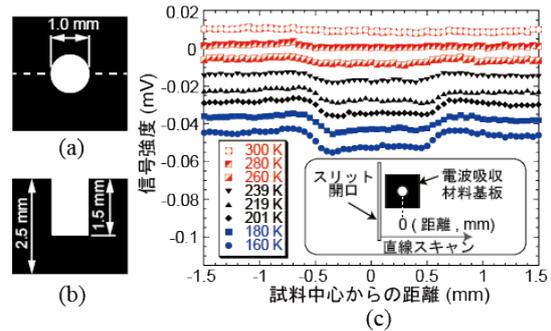


図4 試料温度を変化した場合の信号強度の変化 (a) 試料の構造、(b) (a)点線部分の断面図、(c) 直線スキャンの結果

ている。試料温度は300から160 Kまで変化させた。信号強度が負の値となるのは、図2の受信器ブロック図で、PINスイッチによりプローブが接続された際の検出器からの出力電圧が無反射終端が接続された際の出力電圧と比較して小さいことを意味している。出力信号強度が試料温度に比例して変化していることから、プローブにより試料から放出された熱雑音信号が計測されていることが確認できた。本結果より、Yファクタ法を用いて得られたシステム雑音温度、温度分解能はそれぞれ8000 K、0.8 K（時定数：1秒）であった。これらの値はミリ波帯高感度受信器の特性としては悪いものであるが、原因はプローブの透過率が30%程度と低いことによるものである。本研究期間内ではこれら特性を改善するに至らなかったが、(2)でその成果を記載する高分解能高感度計測用スリットプローブを使用することにより改善可能と考えている。

図5(a)に試料温度を260から200 Kまで変化させた場合の画像再構成結果を示す。測定条件は、直線スキャンのサンプリング間隔50 μm 、直線スキャンのサンプリング点数61、回転スキャンの角度間隔 3° 、投影データ数（直線スキャンの回数）31、プローブと試料との間隔10 μm 、ロックインアンプの時定数1秒、画像サイズ3 mm \times 3 mmである。これらの再構成画像は、試料の構造（形状、材料不均一）に依存する影響を含んだ熱画像である。これは、近接場計測用プローブと試料との相互作用により、試料からプローブへの熱雑音信号の透過及び受信器からプローブへの熱雑音信号の反射が画像化範囲内で不均一になっていることが原因である。本影響を除去するために、現有のミリ波帯ベクトル・ネットワーク・アナライザを用いたアクティブ計測を実施し、上記透過の分布を明らかにした。図5(b)が本分布を表す画像である。図5(b)の画像を用いて図5(a)の画像を補正した熱画像を図5(c)に示す。図5(a)で見られる試料に空けた穴の部分に発生しているリング状のパターンが消失していること、画

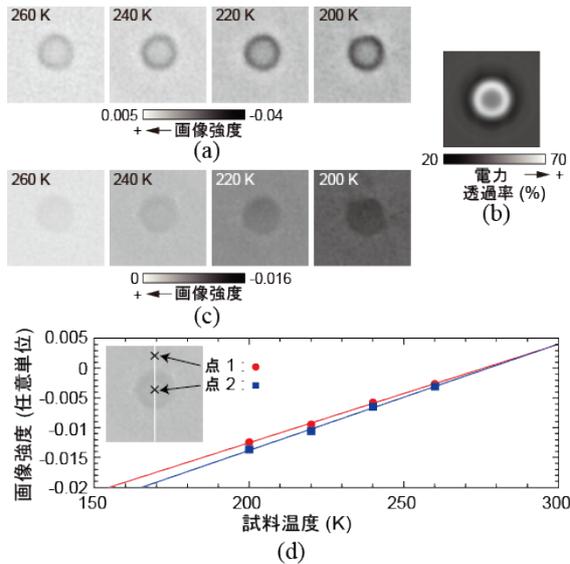


図5 画像再構成結果 (a) 再構成画像、(b) 電力透過率分布、(c) 熱画像、(d) 熱画像上2点の画像強度の試料温度に対する変化

像強度が試料厚さ方向の熱勾配のために発生している温度差の影響範囲内に収まっていることが確認できた。図5(d)は、図中に示す画像上2点における画像強度の試料温度に対する変化を示している。2点の画像強度が異なっているのは、上記熱勾配のためである。画像強度は図4の信号強度と同様に試料温度に対して直線的变化していること、2点の画像強度に対するフィッティング直線は、システムが熱平衡状態となる室温300 Kで交わっていることが確認できた。本結果は図5(c)の画像が試料から放出されている熱雑音信号のみを反映する熱画像となっていることを証明するものである。

(2) 高分解能高感度テーパ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。本研究では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、従来製作を実施していた図6にその構造を示す新型スリットプローブの開発を継続して実施した。電気鋳造により製作した金属導波管部先端に、異方性エッチング、収束イオンビーム (FIB) 加工等の半導体プロセスを利用して製作したシリコン (Si) 製の金メッキ付チップ (シリコンチップ) を装着している。本チップは先端に高分解能化に有効な微小スリット開口を有するばかりでなく、高感度計測に重要なインピーダンス整合素子としても動作することを確認済みである。図7に開発を実施したシリコンチップの製作プロセスを示す。現在までに図7(b)に示す通り、開口高さ5 μm のシリ

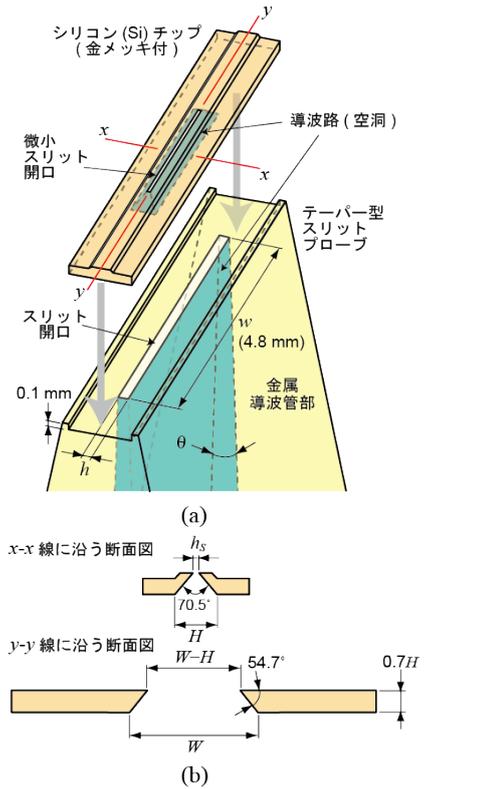


図6 微小スリット開口を有するシリコン製チップを装着する新型スリットプローブ (a) プローブ全体図、(b) シリコン製チップの構造

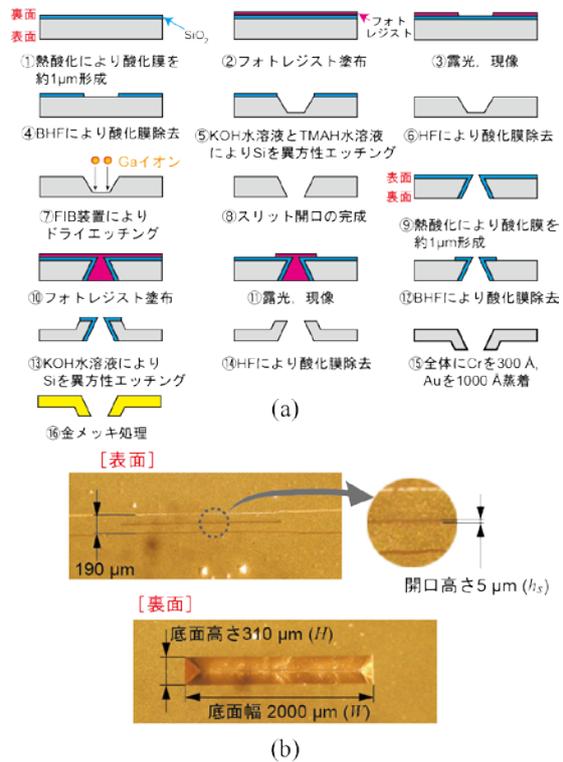


図7 シリコンチップの製作プロセス (a) と完成したチップの写真 (b)

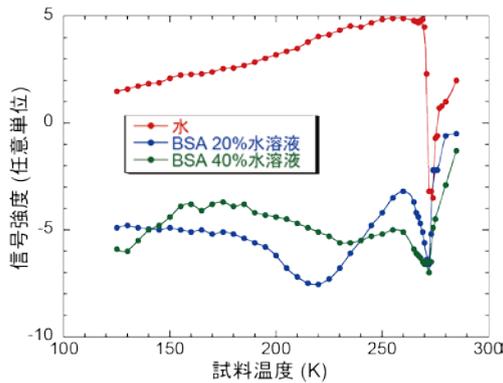


図8 水溶液温度による出力信号強度の変化

ット開口を有するチップを歩留まりよく製作するプロセスを開発することに成功している。

本プローブを使用することにより、熱画像取得の空間分解能を(1)の実験の場合と比較して20分の1、システム雑音温度及び温度分解能を4分の1へと改善可能との見込みを得ている。

(3) 応用計測の検討

応用計測として、タンパク質水溶液 (BSA : bovine serum albumin、ウシ・血清・アルブミン) を測定対象とし、室温から125 Kの低温状態での熱放射計測を試みた。結果を図8に示す。水の場合は信号強度が温度に比例して増加するのに対して、BSA水溶液の場合は比例関係から大きく逸脱した信号強度変化が確認できた。本結果は、BSAの構造変化あるいはBSAの水和状態の変化により、熱放射信号が変化したことを示している。本結果は、本計測技術がタンパク質等の機能原理を解明する上で有効な手段となり得ることを示唆するものである。

以上の成果は、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3件)

- ① T. Nozokido, M. Ishino, H. Kudo, and J. Bae, Near-Field Imaging of Thermal Radiation at Low Temperatures by Passive Millimeter-Wave Microscopy, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 84, pp. 036103-1-3, 2013, DOI 10.1063/1.4794911
- ② T. Nozokido, M. Ishino, M. Tokuriki, H. Kamikawa, and J. Bae, Apertureless Near-Field Microscopy Using a Knife Blade

as a Scanning Probe at Millimeter Wavelengths, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 112, pp. 074907-1-6, 2012, DOI 10.1063/1.4757954

- ③ T. Nozokido, N. Miyasaka, and J. Bae, Near-field Slit Probe Incorporating a Micromachined Silicon Chip for Millimeter-Wave Microscopy, Microwave and Optical Technology Letters, 査読有, Vol. 53, pp. 660-664, 2011, DOI 10.1002/mop.25793

〔学会発表〕 (計9件)

- ① 【招待講演】 T. Nozokido, Millimeter-Wave Active and Passive Microscopies, 2013 URSI Commission B International Symposium on Electromagnetic Theory, 2013年5月21日, Hiroshima, Japan (Symposium Proceedings, 査読有, pp. 25-28)
- ② M. Ishino and T. Nozokido, Near-Field Thermal Imaging by Passive Millimeter-Wave Microscopy, IEEE AP/MTT-S Nagoya Chapters, Midland Student Express, 2012年11月9日, 金沢工業大学
- ③ M. Ishino, Y. Yoshida, and T. Nozokido, Near-Field Imaging of Thermal Radiation by Passive Millimeter-Wave Microscopy, 37th International Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves, 2012年9月25日, Wollongong, Australia (Conference Proceedings, 査読有, Paper No. Mon-B-3-4, 2 pages, DOI 10.1109/IRMMW-THz.2012.6380297)
- ④ T. Nozokido, Y. Ohmiya, and M. Ishino, Millimeter-Wave Apertureless Near-Field Microscopy Using a Knife Blade as a Scanning Probe, 37th International Conference on Infrared, Terahertz and Millimeter Waves, 2012年9月25日, Wollongong, Australia (Conference Proceedings, 査読有, Paper No. Tue-Pos-9, 2 pages, DOI 10.1109/IRMMW-THz.2012.6380471)
- ⑤ 石野学, 吉田健太郎, 荻戸立夫, ミリ波帯パッシブマイクロコピーによる熱放射の近接場イメージング, 2012電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2012年9月14日, 富山大学
- ⑥ T. Nozokido, Y. Nakahashi, Y. Ohmiya, and K. Yamamoto, Millimeter-Wave Scattering Microscopy Using a Knife Blade as a Scanning Probe, Asia-Pacific Microwave Conference 2011, 2011年12月8日, Melbourne, Australia (Conference Proceedings, 査読有, pp. 1578-1580)
- ⑦ M. Ishino and T. Nozokido, Development of Passive Millimeter-Wave Microscopy, IEEE AP/MTT-S Nagoya Chapters, Midland Student Express, 2011年11月5日, 金沢工業大学

⑧ H. Kamikawa and T. Nozokido、Signal Processing for High-Resolution Millimeter-Wave Microscopy Using Scanning Probes with Line-Like Tips、IEEE AP/MTT-S Nagoya Chapters, Midland Student Express、2011年11月5日、金沢工業大学

⑨ 荻戸立夫、宮坂紀行、ミリ波マイクロコピー用高分解能スリット型プローブの開発、2010年12月16日、金沢工業大学(電子情報通信学会技術報告、査読無、MW2010-127、pp. 29-34)

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