

# 冷却管とパラボラ反射鏡による ミリ波パッシブイメージングの物体検知特性の改善

栗山 弘平<sup>†</sup> 佐藤 弘康<sup>†</sup> 澤谷 邦男<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-05

E-mail: †{kuriyama,sahiro,sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

**あらまし** 77GHz帯ミリ波パッシブイメージング装置の物体検知特性を改善するために、低熱雑音源として冷却水を通した直管形誘電体管を放物筒面の焦線に配置した冷却管・パラボラ反射鏡を用いる手法を提案している。試作した冷却管・パラボラ反射鏡の開口分布を測定した結果、冷却管の位置を調整することにより一様な低熱雑音の分布が得られることを示している。さらに冷却管・パラボラ反射鏡を人体の後方に配置した逆光の場合、及び人体と物体にパラボラ反射鏡を向けた順光の場合についてイメージングを行った結果を示し、前者ではミリ波画像における人体と背景のコントラストの向上、後者ではCD-ROM等の平面導体や導体球等の散乱導体の検知特性が改善されることを示している。

**キーワード** ミリ波, 冷却管, パラボラ反射鏡, パッシブイメージング, 低熱雑音源

## Improvement of Object Recognition in Passive Millimeter-wave Imaging Using Cooling Tube with Parabolic Reflector

Kohei KURIYAMA<sup>†</sup>, Hiroyasu SATO<sup>†</sup>, and Kunio SAWAYA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Tohoku University Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

E-mail: †{kuriyama,sahiro,sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** In order to improve the quality of object recognition characteristics in passive millimeter-wave (PMMW) imaging, a method using a dielectric pipe occupied by cooling water placed on focus line of a parabolic reflector is proposed. Uniform aperture distribution of a parabolic reflector with low brightness temperature is obtained by adjusting the position of cooling water tube. Furthermore, the back-lighting PMMW imaging using a cooling tube with parabolic reflector behind a human body and the forward-lighting PMMW imaging using them illuminating a human body and objects are performed. It is shown that the contrast of a human body and the background in PMMW images are improved in the case of the back-lighting. The contrast of human body and conducting scatterers such as a conducting plate and a conducting sphere are also improved in the case of the forward-lighting.

**Key words** Millimeter wave, Cooling tube, Parabolic reflector, Passive imaging, Low noise source

### 1. まえがき

近年、テロ・犯罪等によって安全・安心な社会が脅かされてきており、液体爆発物やプラスチック爆弾等、金属探知機で検知できない不審物を所持する不審者を迅速に検知する手段が望まれている。ミリ波パッシブイメージングは、人や物から放射されるミリ波帯の熱雑音を受信し、非接触・非侵襲で衣服下の不審物を検知可能な技術として、実用化が期待されている [1]。

筆者らのグループはこれまで、空港等の水際において使用するための77GHz帯ミリ波パッシブイメージング装置を開発し、

実用性について評価を進めてきた [1-4]。パッシブイメージングによる物体の検知において、液体爆発物やプラスチック爆弾、セラミックナイフ等の誘電体の検知では、イメージング素子の温度分解能の向上が重要となるが、拳銃や金属製ナイフ、起爆装置等の導体の検知では、イメージング装置は導体に入射した周囲環境からの熱放射による散乱波を観測することになり、導体の視認性を向上させるためには、周囲環境の熱雑音強度分布を制御する必要がある。

筆者らはこれまで、人体の輪郭および輪郭に置かれた所持物の視認性と検知特性を改善する目的で、人体の後方に配置する

逆光熱雑音源として直管形蛍光管を放物筒面の焦線に配置した蛍光管・パラボラ反射鏡を提案した [5-6].

本報告では、ミリ波パッシブイメージングにおいて主に散乱導体の検知特性を改善することを目的として、直管形冷却管を放物筒面の焦線に配置した冷却管・パラボラ反射鏡を提案する。また、開発した 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置を用いて冷却管および試作した冷却管・パラボラ反射鏡が放射している熱雑音強度分布を測定した結果を示すとともに、蛍光管を用いた場合と比較する。さらに、パラボラ反射鏡からの熱雑音を人体の後方から照射する逆光パッシブイメージング、および熱雑音を人体の前方から照射する順光パッシブイメージングを行った結果を示し、人体および導体の視認性について評価した結果を述べる。

## 2. 冷却管・パラボラ反射鏡

### 2.1 構造

冷却管・パラボラ反射鏡を図 1 に示す。放物筒面  $z = x^2/4f$  は焦点が  $f=100$  mm, 材質が厚さ 0.5 mm のステンレス製導体板とし、冷却水循環装置で冷却された冷却水を外径 30mm, 内径 24mm の直管形塩化ビニル管に導き、冷却水を循環させて冷却管を構成し、これを  $z = p$  に配置した。放物筒面は開口幅が 830 mm, 高さ 2000 mm, 奥行き 430 mm である。1 枚の導体板の左右の端部を  $\pm x$  方向からの力で押し曲げることで放物筒面を作製できるので、大形の開口面を比較的容易に実現できる。また、冷却管の位置を変えることにより  $p = f$  の場合は平面波,  $p > f$  の場合は集光波,  $p < f$  の場合は拡散波の波面を有する低温の熱雑音源が実現できる。

### 2.2 冷却管の基本特性

冷却水循環装置内部における冷却水の凍結を防ぐために、冷却水としてラジエーター液を使用した。冷却水循環装置の設定温度を  $-5^\circ\text{C}$  に設定したときの冷却管の表面温度は約  $7.5^\circ\text{C}$  であった。冷却管のミリ波帯における熱雑音強度分布の測定には開発したミリ波パッシブイメージング装置を用いた [1-4]。装置の光学系の構成と座標系を図 2 に示す。レンズの光軸を  $z$  軸とし、物体面  $z = z_{ob}$  に置かれた物体からのミリ波帯の熱雑音を誘電体レンズを介して像面  $z = z_{im}$  に集光し、この像面に置かれたイメージング素子アレイで受信、増幅及び検波して受信電圧の 2 次元分布を画像化した。誘電体レンズは口径が 500 mm の非球面ポリエチレンレンズであり、振動リフレクタを垂直面

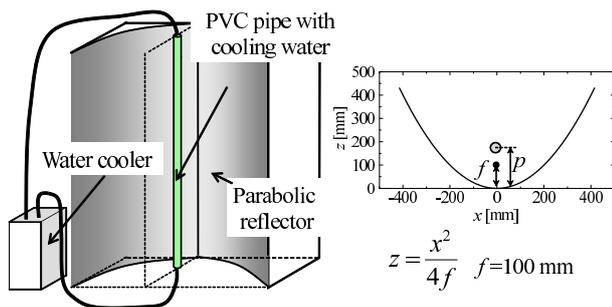


図 1 冷却管・パラボラ反射鏡。

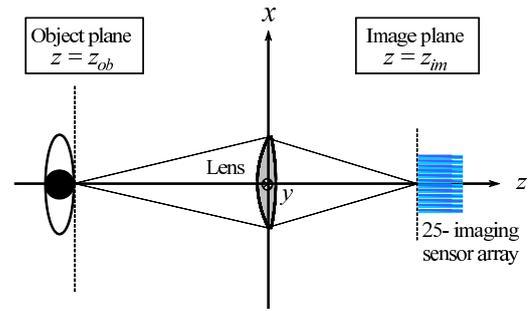
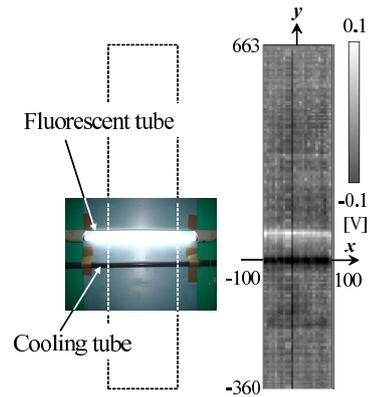
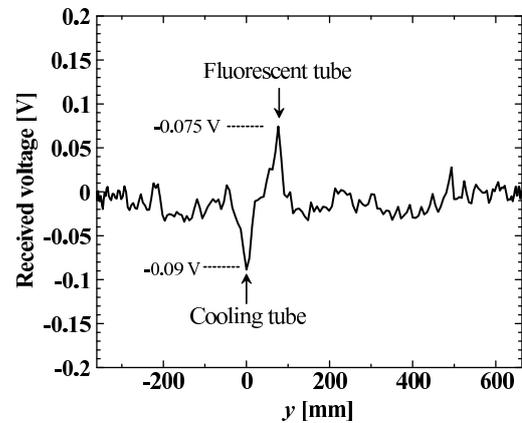


図 2 光学系の構成。



(i) 光学画像 (ii) ミリ波画像  
(a)  $xy$  面



(b)  $y$  軸 ( $x=0$ )

図 3 間隔 120 mm の冷却管と蛍光管のミリ波画像と  $y$  軸に沿う受信電圧分布. ( $z_{ob}=-1950$  mm,  $z_{im}=1081$  mm)

で振動させて、水平配列 25 素子 1 次元イメージングアレイを用いて受信電圧の 2 次元分布を画像化してミリ波画像を得ている。

まず始めに冷却管と蛍光管を撮像し、受信電圧の分布を測定した。 $x$  方向に平行な冷却管と蛍光管を間隔 120 mm で物体面  $z_{ob}=-1950$  mm に配置したときの  $z_{im}=1081$  mm におけるミリ波画像を光学画像と共に図 3(a) に示す。ここで、電圧レベルは視野上端部の物体が置かれていない位置を観測したときの受信電圧が 0 となるように電圧をオフセットした場合の値であり、ミリ波画像の濃淡は色が白いほど受信電圧が大きいことを表し

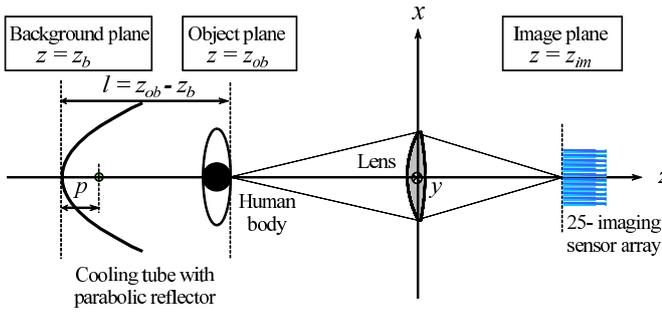


図4 冷却管・パラボラ反射鏡による逆光の光学系の構成。

ている。x 方向の受信電圧分布から、冷却管、蛍光管ともに管軸方向に概ね一様な熱雑音強度分布が得られることがわかった。以後、物体面は  $z_{ob} = -1950$  mm、像面は  $z_{im} = 1081$  mm とする。y 軸に沿う受信電圧分布を図 3(b) に示す。冷却管、蛍光管の受信電圧はそれぞれ  $-0.09$  V,  $0.075$  V が得られ、周囲環境の背景に対する受信電圧差は冷却管の方が大きい結果となった。

### 3. 逆光を用いたパッシブイメージング

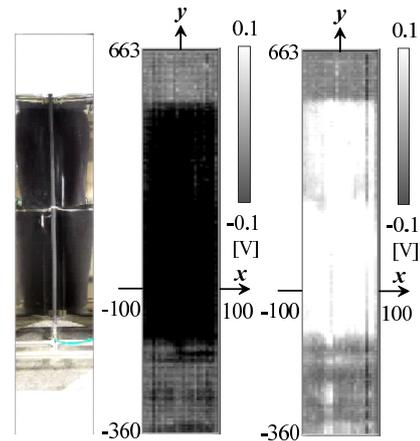
#### 3.1 開口分布

冷却管・パラボラ反射鏡及び人体を被写体とした光学系の構成と座標系を図 4 に示す。人体の背景に位置する背景面を  $z = z_b$  とし、この位置にパラボラの頂点が一致するように配置した。ここで  $z_b = -2880$  mm,  $z_{im} = 1081$  mm とし、物体面  $z = z_{ob}$  と背景面  $z = z_b$  の差は  $l = 930$  mm とする。なお、パラボラ反射鏡の上端領域にはアルミ导体板を配置しており、この上端領域におけるイメージング素子アレーの出力電圧が全て 0 となるように校正している [4]。上端領域に导体板を配置して校正することは、导体板を鏡面とした部屋の周囲環境の熱雑音強度を計測することを意味し、周囲環境の熱雑音強度に対する温度差を計測していることに対応する。

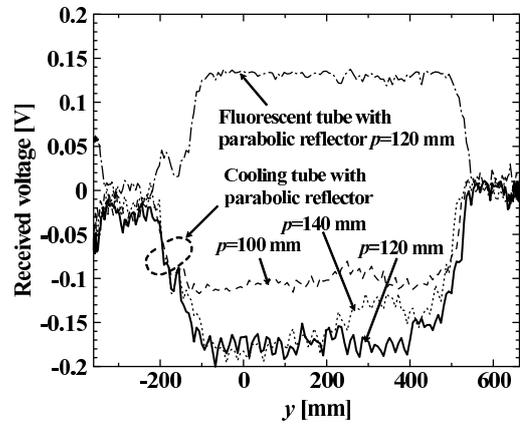
図 4 の光学系において、人体がない状態で冷却管、蛍光管を使用したパラボラ反射鏡の開口分布を測定した。ただし、開口分布の測定位置は背景面  $z = z_b + z_{ob}$  であることに注意を要する。 $p = 120$  mm の場合の開口分布を光学画像と共に図 5(a) に示す。冷却管と蛍光管いずれの場合についても開口面内ではほぼ一様な分布が得られた。 $p = 100$  mm,  $120$  mm,  $140$  mm の冷却管・パラボラ反射鏡の y 軸に沿う開口分布を図 5(b) に示す。 $p = 120$  mm のときに一様かつ背景との電圧差が最大となった。なお、ここでは示していないが、蛍光管・パラボラ反射鏡においても  $p = 120$  mm において一様分布が得られた。 $p = f$  の平面波よりも  $p > f$  の集光波の場合に一様分布が得られることは興味深い。また、冷却管・パラボラ反射鏡の受信電圧は約  $-0.18$  V、蛍光管・パラボラ反射鏡の場合は約  $0.13$  V が得られ、冷却管の場合が蛍光管の場合に比べて周囲環境の熱雑音強度に対するコントラストが高くなる結果となった。

#### 3.2 イメージング

冷却管・パラボラ反射鏡を人体背後の背景面  $z_b$  に配置した逆光によるパッシブイメージングを行った。パラボラ反射鏡が



(a) xy 面。(i) 光学画像, (ii) 冷却管・パラボラ反射鏡, (iii) 蛍光管・パラボラ反射鏡



(b) y 軸 ( $x=0$ )

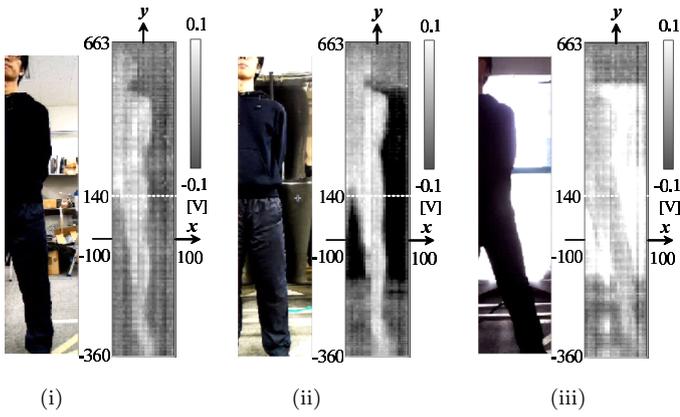
図 5 冷却管・パラボラ反射鏡と蛍光管・パラボラ反射鏡の開口分布。  
( $z_b = -2880$  mm,  $z_{im} = 1081$  mm,  $p = 120$  mm)

ない場合、背景面  $z = z_b$  に冷却管・パラボラ反射鏡を配置したときと蛍光管・パラボラ反射鏡を配置したときのミリ波画像を光学画像と共に図 6(a) に示す。冷却管・パラボラ反射鏡があることにより人体と背景のコントラストが向上する結果が得られた。一方、蛍光管・パラボラ反射鏡の場合は人体よりも大きな熱雑音強度が観測されており、人体の輪郭に置かれた物体の検知特性が改善されることを既に報告している [5-6]。

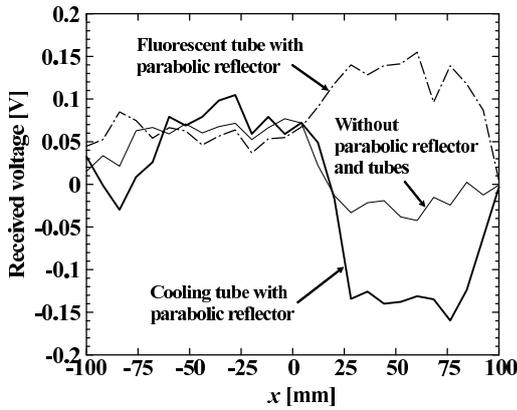
図 6 の  $y = 140$  mm における x 軸方向の受信電圧分布を図 6(b) に示す。人体と冷却管・パラボラ反射鏡の電圧差  $\Delta V_c = 0.2$  V、人体と蛍光管・パラボラ反射鏡の電圧差  $\Delta V_f = 0.08$  V、人体と周囲環境の電圧差  $\Delta V_b = 0.08$  V が得られ、背景と人体のコントラストは冷却管・パラボラ反射鏡を用いた場合が大きくなる結果が得られた。

### 4. 順光を用いたパッシブイメージング

パッシブイメージングによる物体の検知特性は、人体と物体の熱雑音強度差が大きいほど向上する。検知する物体が散乱導体の場合、イメージング装置は散乱導体に入射した周囲環境が

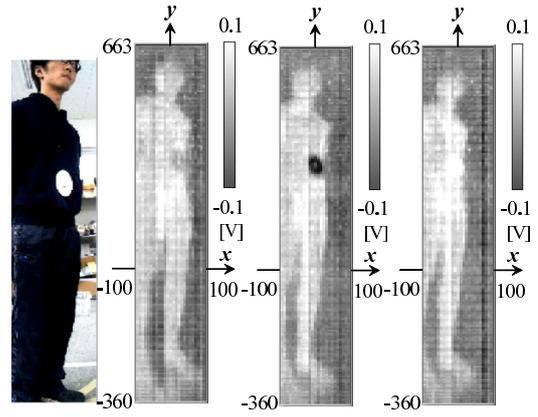


(a)  $xy$  面. (i) 冷却管, 蛍光管およびパラボラ反射鏡なし, (ii) 冷却管・パラボラ反射鏡, (iii) 蛍光管・パラボラ反射鏡

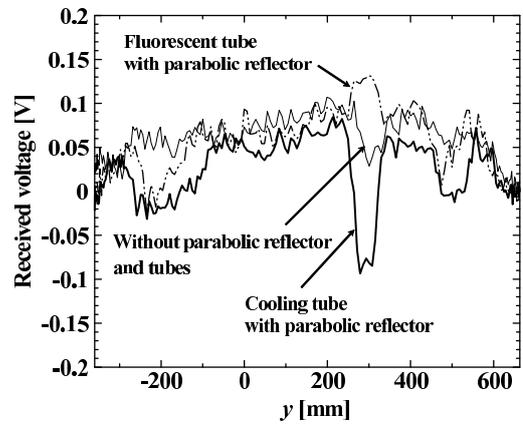


(b)  $y=140$  mm

図 6 逆光ミリ波画像と  $y=140$  mm における  $x$  軸方向の受信電圧分布. ( $z_b=-2880$  mm,  $z_{ob}=-1950$  mm,  $z_{im}=1081$  mm,  $p=120$  mm)



(a)  $xy$  面. (i) 光学画像, (ii) 冷却管, 蛍光管およびパラボラ反射鏡なし, (iii) 冷却管・パラボラ反射鏡, (iv) 蛍光管・パラボラ反射鏡



(b)  $y$  軸 ( $x=0$ )

図 8 CD-ROM と人体の順光ミリ波画像と  $y$  軸に沿う受信電圧分布. ( $l=930$  mm,  $z_{ob}=-1950$  mm,  $z_{im}=1081$  mm,  $p=120$  mm)

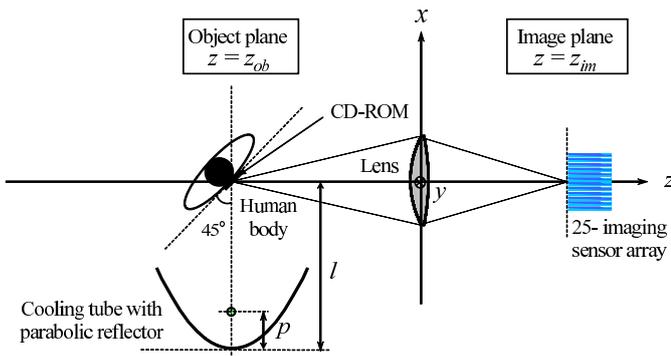


図 7 冷却管・パラボラ反射鏡による順光の光学系の構成.

らの熱放射による散乱波を観測することになるので, 散乱導体を所持した人体へパラボラ反射鏡からのミリ波帯熱雑音を照射する順光イメージングを行い, 検知特性に対する基礎実験を行った. 散乱導体として, 口径 120 mm の CD-ROM, 口径 30 mm の円形導体板, 金属定規の 3 種類の平面導体, および導体球を用いた.

順光イメージングの光学系の構成を図 7 に示す. パラボラ反射鏡の向きを  $+x$  軸方向とし, 人体は  $z$  軸に対して  $45^\circ$  回転し

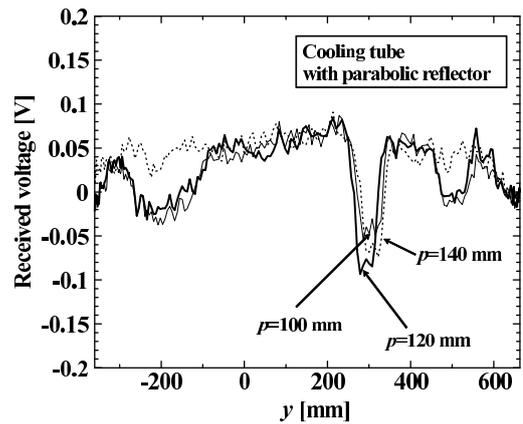


図 9 順光において  $p$  を変化したときの CD-ROM と人体の  $y$  軸に沿う受信電圧分布 ( $l=930$  mm,  $z_{ob}=-1950$  mm,  $z_{im}=1081$  mm).

た向きとした. ここで, 反射鏡の頂点と人体の回転軸の距離を  $l=930$  mm とした. この光学系は, 鏡像の原理により導体板が  $z$  軸に対して角度  $45^\circ$  で配置された場合に図 4 の光学系に一致し,  $z = z_{ob}$  に立つ人体と, 平面導体を鏡面として  $z = z_b$  に置

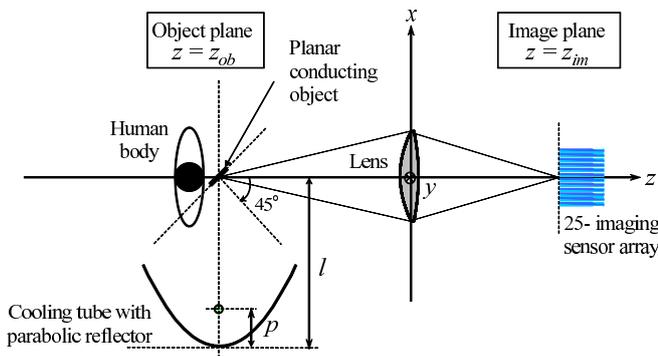
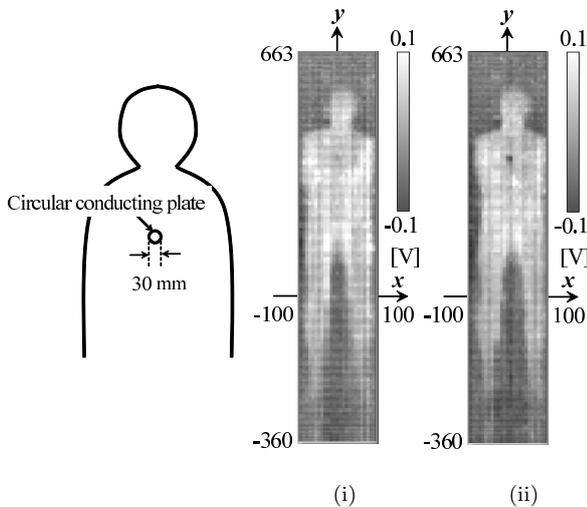
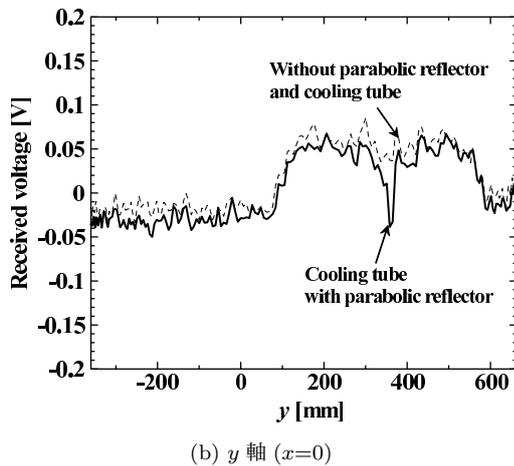


図 10 順光の光学系の構成。(人体正面で散乱導体を  $\theta=45^\circ$  回転した場合)



(a)  $xy$  面。(i) 冷却管, パラボラ反射鏡なし, (ii) 冷却管・パラボラ反射鏡あり)

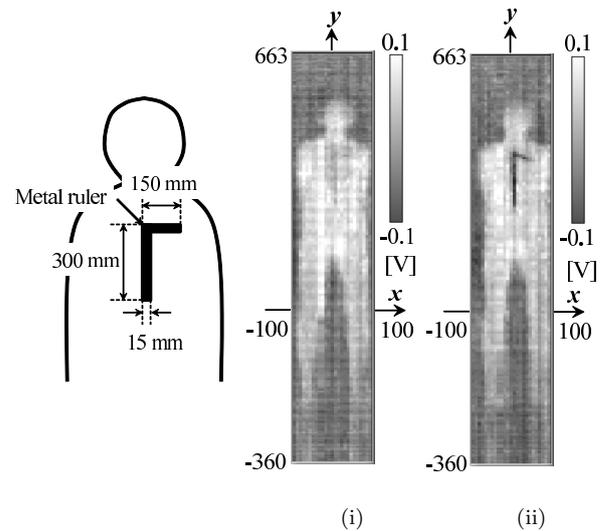


(b)  $y$  軸 ( $x=0$ )

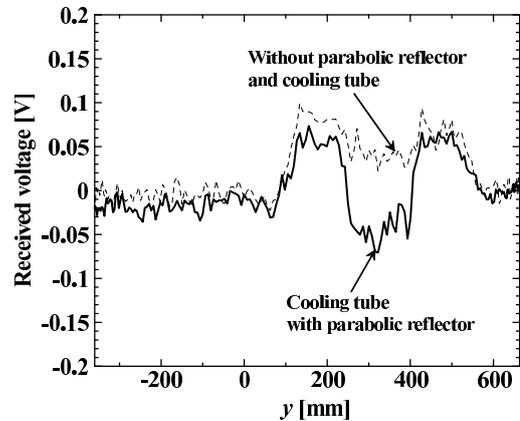
図 11 口径 30 mm の円形導体板と人体の順光ミリ波画像. ( $l=930$  mm,  $z_{ob}=-1950$  mm,  $z_{im}=1081$  mm,  $p=120$  mm)

かれたパラボラ反射鏡の開口分布を同一の物体面内で観測することに相当する。

口径 120 mm の CD-ROM を腹部に所持した人体のミリ波画像を図 8(a) に示す。冷却管・パラボラ反射鏡を用いた場合に高いコントラストの CD-ROM の像が得られた。図 8(a) の  $y$  軸に沿う受信電圧分布を図 8(b) に示す。人体及び冷却管・パ



(a)  $xy$  面。(i) 冷却管, パラボラ反射鏡なし, (ii) 冷却管・パラボラ反射鏡あり)



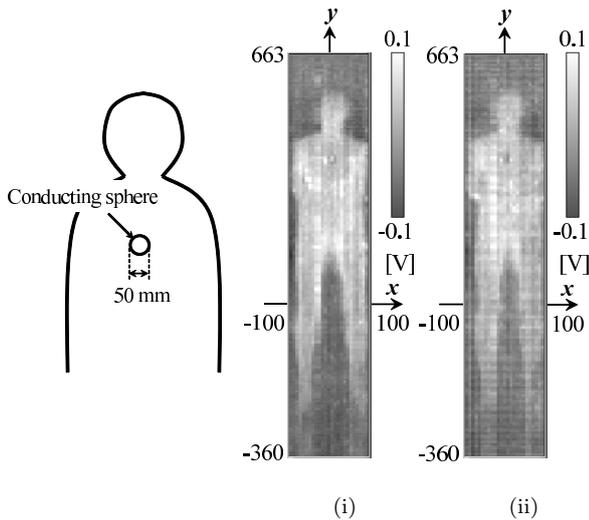
(b)  $y$  軸 ( $x=0$ )

図 12 金属定規と人体の順光ミリ波画像と  $y$  軸に沿う受信電圧分布. ( $l=930$  mm,  $z_{ob}=-1950$  mm,  $z_{im}=1081$  mm,  $p=120$  mm)

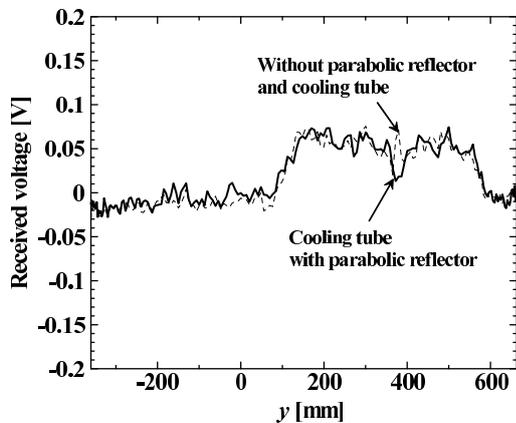
ラボラ反射鏡を用いた CD-ROM の電圧差は  $\Delta V_c=0.15$  V, 人体及び蛍光管・パラボラ反射鏡を用いた CD-ROM の電圧差は  $\Delta V_f=0.05$  V, 人体及びパラボラを用いないときの CD-ROM の電圧差は  $\Delta V_b=0.05$  V が得られ, 人体と物体のコントラストは冷却管・パラボラ反射鏡を使用した場合に大きくなる結果が得られた。

さらに, 冷却管・パラボラ反射鏡において  $p=100$  mm, 120 mm, 140 mm のとしたときの  $y$  軸に沿う受信電圧分布を図 9 に示す。  $p=120$  mm のときに CD-ROM の位置における受信電圧が最も低下する結果が得られ, 逆光を用いたイメージングと同様, 平面波照射よりも集光波照射の方がコントラストの向上に寄与する結果を得た。

続いて, 口径 30 mm の円形導体板, 幅 15 mm の金属定規, および導体球を所持した人体の順光イメージングを図 10 に示す光学系を用いて行った。平面導体の法線方向と  $z$  軸の角度  $\theta=45^\circ$  となるように 3 種類の散乱体を発泡スチロールに固定し, 人体正面に配置している。円形導体板, 金属定規, 導体球の場合のミリ波画像, および各散乱導体を含む  $y$  軸に沿う受



(a)  $xy$  面. (i) 冷却管, パラボラ反射鏡なし, (ii) 冷却管・パラボラ反射鏡あり



(b)  $y$  軸 ( $x=0$ )

図 13 口径 50 mm の導体球と人体の順光ミリ波画像と  $y$  軸に沿う受信電圧分布. ( $l=930$  mm,  $z_{ob}=-1950$  mm,  $z_{im}=1081$  mm,  $p=120$  mm)

信電圧分布をそれぞれ図 11, 図 12, 図 13 に示す. 円形導体板, 金属定規を人体前方に配置したミリ波画像では比較的高いコントラストが得られた. 一方, 導体球のミリ波画像では, 設定した範囲  $\pm 0.1$  V ではパラボラ反射鏡の有無によらず導体球の像が見えていない. 図 11(b), 図 12(b), 図 13(b) の結果から, 人体及び冷却管・パラボラ反射鏡を用いた円形導体板の電圧差は  $\Delta V_c=0.08$  V, 人体及びパラボラを用いないときの円形導体板の電圧差は  $\Delta V_b=0$  V, 人体及び冷却管・パラボラ反射鏡を用いた金属定規の電圧差は  $\Delta V_c=0.12$  V, 人体及びパラボラを用いないときの円形金属定規の電圧差は  $\Delta V_b=0.03$  V, 人体及び冷却管・パラボラ反射鏡を用いた導体球の電圧差は  $\Delta V_c=0.15$  V, 人体及びパラボラを用いないときの導体球の電圧差は  $\Delta V_b=0.04$  V が得られ, いずれも人体と物体のコントラストは冷却管・パラボラ反射鏡を使用した場合にわずかに大きくなる結果が得られた. ここで使用したレンズ光学系は, 文献 [1-4] において空間分解能 20 mm が得られる設計であり [4], 設計した空間分解能程度, あるいはそれ以上の分解能を有して

いることは興味深い.

以上の結果から, 順光パッシブイメージングを用いた場合, 平面導体は鏡像の原理が成り立つ specular な角度 (この場合は  $45^\circ$ ) で物品が配置されている場合は検知特性が向上することが明らかとなった.

## 5. まとめ

ミリ波帯熱雑音の熱源として冷却水を通した直管形塩化ビニル管を放物筒面の焦点に配置した冷却管・パラボラ反射鏡を提案した. 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置を用いて冷却管が放射している熱雑音の強度を測定した結果, 冷却管は背景よりも約 0.09 V 小さいことがわかった. 提案した冷却管・パラボラ反射鏡を人体の後方に配置した場合, 開口面にわたり人体よりも約 0.2 V 小さい受信電圧分布が得られ, 人と背景のコントラストを向上できた. さらに, この冷却管・パラボラ反射鏡を順光を用いたパッシブイメージングに利用することにより, 鏡像の原理が成り立つ specular な角度に置かれた平面導体の検知特性が改善されることを示した. また, 散乱導体球に関しては, 周囲環境から球に入射する熱雑音の一部を抑えることにより, 検知特性の改善が見込めるという結果を得た. 今後, 照射角の広角化, 誘電体散乱体の順光イメージングについて検討する予定である.

## 謝 辞

本研究の一部は文部科学省科学技術振興調整費「安全・安心な社会のための犯罪・テロ対策技術等を実用化するプログラム」の助成の下に行われた. また, パラボラ反射鏡の作製および冷却システムの構築にあたり株式会社システムリンクージュ千葉康明氏から多大なる協力を頂いた.

## 文 献

- [1] 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, 水野 皓司, “ミリ波パッシブイメージング技術 (セキュリティ分野への応用を主に), ” 計測と制御, 第 42 巻, 第 1 号, pp. 748-753, 2009.
- [2] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田淳, “77GHz 帯ミリ波パッシブ撮像装置の開発,” 2009 年電子情報通信学会総大会, CS-4-1, 2009.
- [3] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田淳, “77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置,” 2010 年電子情報通信学会総大会, B-1-150, 2010.
- [4] H. Sato, K. Sawaya, Y. Wagatsuma and K. Mizuno, J. Uemura, M. Takeda, J. Takahashi, K. Yamada, K. Morichika, T. Hasegawa, H. Hirai, H. Niikura, T. Matsuzaki, S. Kato, J. Nakada, “Passive millimeter-wave imaging for security and safety applications,” SPIE Proceedings, vol. 7671, Orlando, USA, 2010.
- [5] 栗山弘平, 中田 淳, 佐藤弘康, 澤谷邦男, “蛍光管オフセットパラボラアンテナを利用したミリ波パッシブイメージングにおける物体検知特性の改善,” 電子情報通信学会 2010 年総大会, B-1-82, March 2011.
- [6] 栗山弘平, 中田淳, 佐藤弘康, 澤谷邦男, “蛍光管パラボラアンテナを利用したミリ波パッシブイメージングにおける物体検知特性の改善,” 信学技報, vol. 111, no. 172, AP2011-52, pp. 19-24, 2011 年 8 月.