



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	マイクロコンピュータを利用した吸収片走査方式マイクロ波映像装置
Author(s)	北田, 義孝; Kitada, Yoshitaka; 青木, 由直 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 100, 51-61
Issue Date	1980-10-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41630">https://hdl.handle.net/2115/41630</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	100_51-62.pdf



## マイクロコンピュータを利用した吸収片走査 方式マイクロ波映像装置

北田 義孝\* 青木 由直\*\*  
(昭和55年6月30日受理)

### A Microwave Imaging System by Scanning an Absorber-Piece Controlled by a Microcomputer

Yoshitaka KITADA and Yoshinao AOKI  
(Received June 30, 1980)

#### Abstract

A microwave imaging system was constructed by using a microcomputer and experiments with the system was conducted. The principle of the imaging technique adopted in this paper is that shadows of objects by microwave are recorded by scanning an absorber-piece in front of the objects, resulting in images of negative contrast compared with those by a conventional detector-scanned method. The signals produced by the absorber-piece are detected by a fixed receiver and converted into 8 bit digital data.

These data are stored in incore-memories of the microcomputer and stored data are displayed sequentially on a CRT scope as the absorber-piece scans the two-dimensional wave field, resulting in almost real-time imaging system. The experiment was conducted with a microwave of 9.6 GHz to record the images of metallic objects, where an electro-conductive sponge of 12 mm × 12 mm was used as a scanned absorber-piece. Numerical processings of microwave images such as averaging of images, adjusting level to produce binary images, contrast emphasis, edge extraction, etc. were conducted in this on-line microwave imaging system.

#### 1. ま え が き

レーダ技術を除けば、現在電波映像技術は実用的なものが未開発の状態にあると言える。特に室内等の比較的狭い空間での映像技術はレーダ技術を応用することも不可能で、この領域での映像技術に関しては確立された方式や装置が無く、研究や開発が充分に行われてきていないのが現状である。しかし、最近各種電波応用機器が用いられるようになり、漏洩電波を可視化して調べたり、アンテナ等の放射特性の研究への応用、光に対する不透明媒質を対象とした電波を利用した新しい映像装置の開発等の必要性が論じられ、レーダ技術ではない新しい電波映像技術の開発研究が望まれている。ここで電波領域での映像技術に光領域で用いられている技術を応用する方法が考えられるが、電波領域では長波長であるため、電波レンズによる結像が難しいこと、写真

\* 日本電気㈱

\*\* 電気工学科 演算工学講座

フィルムのような電波に感応する面状記録素子が未開発であるなどにより、光領域でのカメラに相当するものを電波領域で構成することは困難である。しかし、電場と記録面との点对点マッピングを考えた場合、アンテナなどの回路素子、増幅器などの電子回路、CRT ディスプレイによる表示技術を効果的に組合せ、それらを制御する装置を小型で能率の良いものにすることができれば、映像方式によっては実用的な電波映像装置が構成できる。つまり分解能の点で電波レンズを使用できない場合、ホログラフィやシャドウグラフィ法を用いて上述の映像装置により電波像を可視化して観測する装置が考えられる。

特に最近のマイクロコンピュータの発展は、マイクロコンピュータ制御による小型で高性能の電波映像装置の実現を示唆するもので、本論文ではマイクロコンピュータを組み込んだ電波映像装置を試作し実験的検討を行っている。本論文で検討されている映像法は電波による物体の影を直接可視化する方法で、この映像法は極めて単純なため、映し出す物体の形状や分解能に制約があるが、ホログラフィ法のように像再のために複雑な演算を行う必要が無く、走査を速めたり、アンテナ・アレーを用いることにより、(準)実時間で像が見れるという利点を持っており、実用的な電波映像装置の可能性もあり、この点についても実験結果をもとにして検討を加えている。

## 2. マッピングの原理

電場のマッピングを行う場合、通常図1 (a) に示されるプローブ用の小開口のアンテナの走査を行う方法が考えられる。また送波器や物体の走査を行う方法<sup>1)</sup>も提案されている。これらに対して、図1 (b) に示すように、プローブ用のアンテナの代わりに開口の大きな受波用アンテナを固定しておき、小さな電波の遮蔽物を走査して電場のマッピングを行う方式<sup>2)</sup>が考えられる。前者のマッピングは、電場の一点での受信電力によって場の強度の表示を行うのに対し、後者のマッピングは前者と相補的關係にあり、遮蔽物により反射・遮蔽された受信電力の減少分によって場の強度の表示を行う。すなわち、遮蔽物が強い電場内にある程多くの電力を反射・遮蔽するから、受信電力は減少し、表示は暗くなる。よってネガのイメージで電場のマッピングが可能となる。しかし、遮蔽物走査では、遮蔽物からの回折波が物体の影の像に干渉する為に良質の像が得られにくい。

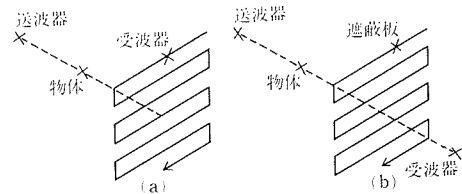


図1 相補的な2つのマッピング方法  
受波器走査 (a) 及び遮蔽板走査 (b)

本論文では、従来行われていた導体板の走査のほかに、吸収物体の走査を行う方法を新しく試み、遮蔽板走査方式との比較を行っている。ここで、図1 (a) によるマッピング方式の分解能は受波器の開口によって決まる。これに対し、図1 (b) によるマッピング方式によって得られる電波像は、物体  $O$  と遮蔽板  $S$  とのコリレーション・パターン  $C$  (コリレグラム) になる<sup>3)</sup>。これを式で示すと式 (1) となる。

$$C = O \otimes S + B \quad (1)$$

但し、 $\otimes$  はコリレーション演算を示し、 $B$  はバイアス成分 (DC 成分) を示す。ここで遮蔽板の大きさがごく小さく、 $S = \delta$  とデルタ関数  $\delta$  で近似できる場合は、コリレグラム  $C$  は物体そのものとなり正しい像が得られるが、それ以外の場合には、像はぼけてコリレーション・パターンとなり、分解能が低下することは避けられない。しかし、特にマイクロ波帯においては、受波器の走査よりも、小さな遮蔽物の走査の方が簡便である為、走査形の映像法としては有利である。本論文では図1 (b) のマッピングによる映像装置の開発を目的としているが、以上述べた干

渉や分解能の点から図1(a)のマッピング方法が優れている場合も考えられ、両方法について実験検討を行った。

### 3. 実験装置の構成

#### 3.1 ハードウェア

従来の電波や音波の場のマッピング装置では、その場の強度を可視化する手段としてカメラとフィルムを用いていた。その為、暗室が必要であったり、写真処理の必要性から実時間で像を見ることができないという欠点を持っていた。そこで、本装置では、写真処理技術を全く用いず、全てのデータをデジタル量に変換して処理を行う方式を採用した。その為に像は走査に従って準実時間で観測可能となっている。

図2に本電波映像装置の構成図、及び図3に使用しているマイクロコンピュータシステムのブロック図を示す。実験では9.6GHzのマイクロ波を用いた。マイクロ波は、ガンダイオード発振器により発生させてホーンアンテナから放射した。放射されたマイクロ波は受波用のアンテナで受信され、検波されて電界強度を示す信号になる。信号はオペアンプによる増幅器によって充分増幅されてA/D変換器に入力され、8ビットのデジタル電界強度データに変換される。このデータはインターフェースを介してマイクロコンピュータの画像データバッファエリアにストアされると同時に、内蔵のビデオ・イメージ・ディスプレイ装置によって、現在の走査位置に対応するディスプレイ上の画素の明るさによって刻々と表示される。このイメージ・ディスプレイ装置はテレビ受像機で128画素×128画素を、各点16段階(4ビット)の明暗の表示を行う能力を持っている。走査装置は、上下方向と左右方向にそれぞれパルスモータの駆動系を持ったプログラマブル・スキャナである。また、この走査装置の電源は4台の定電流スイッチング・レギュレータから供給されている。さらに、本装置には、キーボード及びキャラクタディスプレイを装備しており、コマンドやパラメータの入力要求やその入力を対話形式で行うようになっている。補助記憶としては、サポロ・シティ・スタンダード・カセットインターフェースを利用して、カセットテープに録画して保存及び再生が可能となっている。また、サポートシステムに転

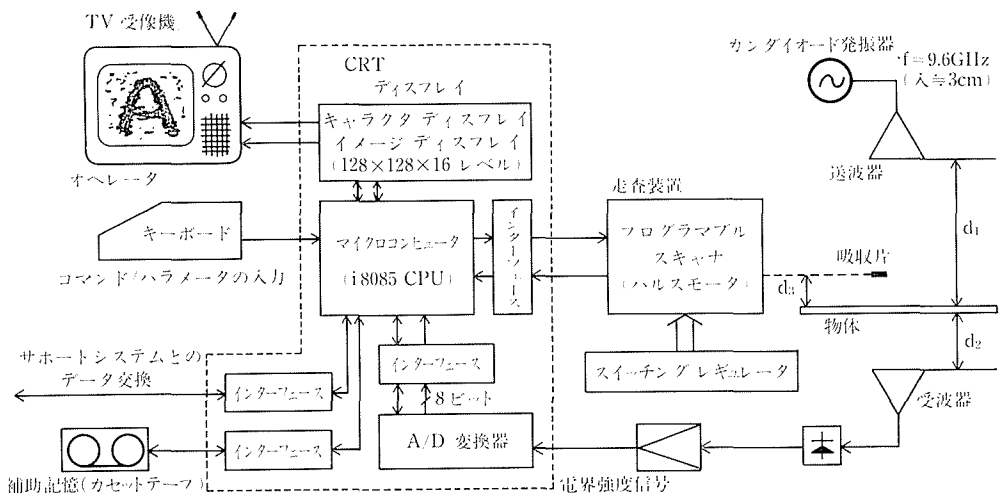


図2 マイクロ波映像システムの構成と実験配置

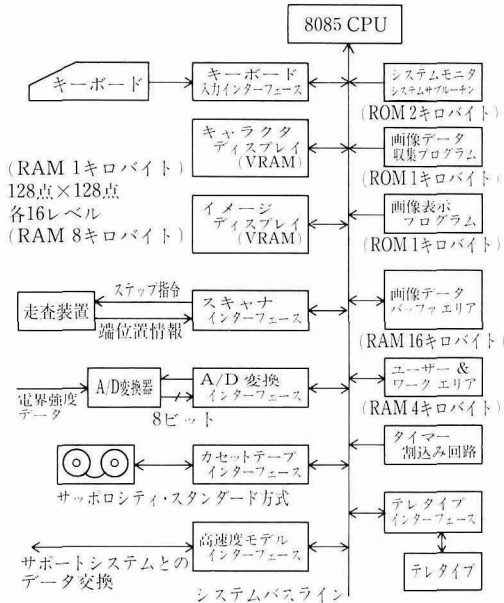


図3 マイコンコンピュータの構成図

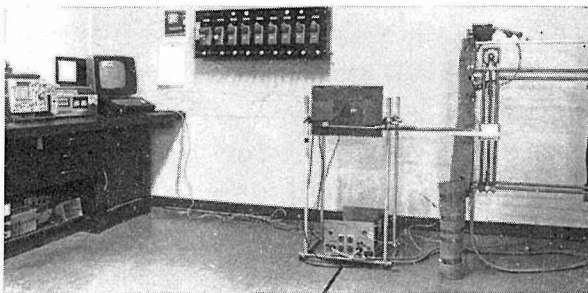


図4 マイクロ波映像システム

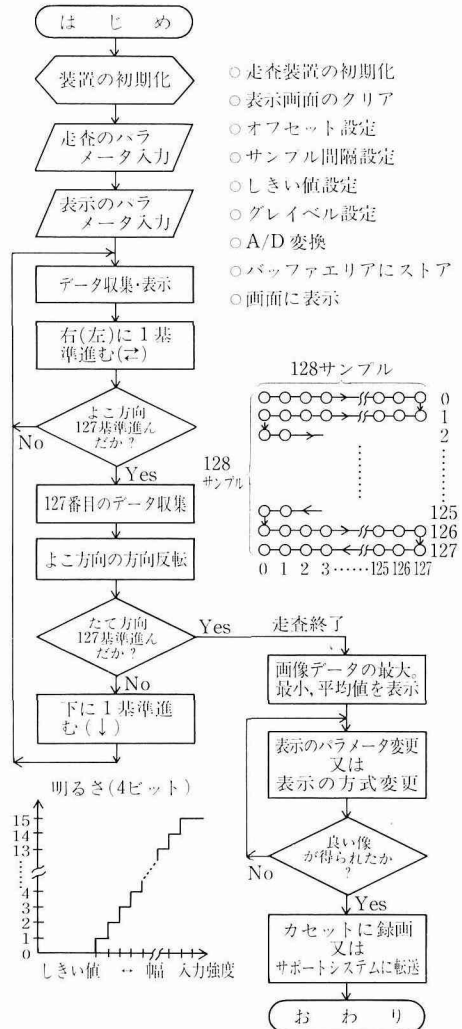


図5 マイクロ波像データ収集のフローチャート

送してディスクにストアすることも可能である。

制御及び処理用のマイクロコンピュータは、インテル社の8ビットCPU、8085を用いたシステムである。マイクロコンピュータは、A/D変換器、走査装置及びイメージ・ディスプレイ装置の制御を行い、画像データの収集を行う。マイクロコンピュータにはROMを4Kバイト、RAMを29Kバイト装備しているが、小型で可搬的なものになっている。図4に走査装置、マイクロコンピュータの外観及び走査時の状態を示す。

### 3.2 ソフトウェア

前述のシステムは、マイクロコンピュータの制御のもとで動作する為に、パラメータはプログラマブルであり、フレキシビリティに富むデータ収集が行える。反面、ソフトウェアに大きく依存していると言える。このソフトウェアとして、2Kバイトのシステムモニタとシステムサプルーチンが開発されている。また画像データ収集用プログラム及び画像表示用プログラム、それぞれ1Kバイトが開発され、ROMにファームウェアとして固定されている。これらのプログラムには、装置全体の初期化、各パラメータ設定、パルスモータのタイミングコントロール、イメ

ージ・ディスプレイ・コントロール等のサブルーチンが含まれている。

次に、画像データ収集のフローチャートを図5に示す。現在走査は 45 cm×45 cm 以下（パラメータにより任意）の平面内でラスタ状走査を行い、等間隔で 128×128 点（固定）のサンプリングを行いデータを収集している。走査に要する時間は最大の範囲の場合で 15 分である。本装置で採用した走査装置は、パルスモータの駆動系を持っている為に、直接デジタル量で位置決定が可能となり、マイクロコンピュータの制御により、ソフトウェア・プログラマブルで、フレキシビリティに富む走査やデータ収集が可能となっており、高精度の走査が実現されている。走査が終了したならば、画像データバッファエリア内に全データがストアされているので、このデータでパラメータや表示方式を変えて繰り返し表示を行い、バイアスレベルやコントラストを変え見やすい像とする。このように、デジタルデータ処理によるプログラマブルな走査・表示が本装置の大きな特徴となっている。

## 4. 実験結果

### 4.1 マイクロ波シャドウグラム

本システムを用いて種々の方式の走査方法により各種の物体のマイクロ波像を得た。まず、マイクロ波シャドウグラムを得る実験のため、物体として銅板にくりぬかれた文字 E を用いた。最初は通常用いられている受波器走査によりシャドウグラムを得た。物体とその走査の様子を図6に、得られた電波像を図7に示す。この像には、文字 E とその支持材であるアクリル板が可視化されているのがわかる。次に、物体走査によるシャドウグラムの実験を行った。得られた像を図8に示す。この像にも同様に文字 E が可視化されており、E の下方には走査装置と物体とを連結する細い竹材のシャドウが認められる。これらのシャドウグラムの分解能を測定する為

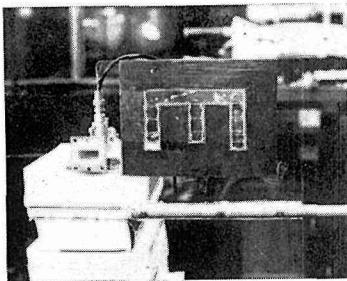


図6 走査中の物体 E

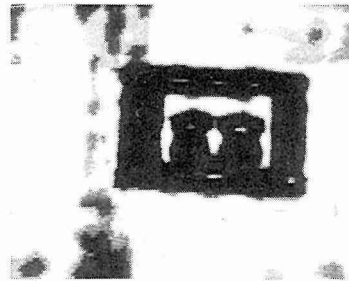


図7 受波器走査による  
シャドウグラム

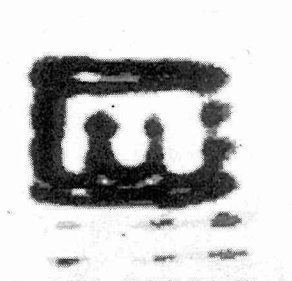


図8 物体走査によるシャドウグラム

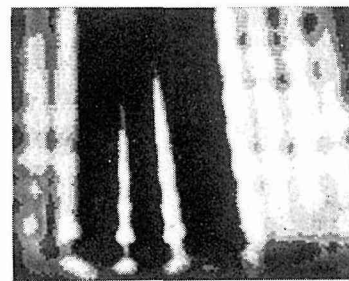


図9 3枚のアベミ板の  
シャドウグラム

に、幅が 2.0 cm, 1.5 cm, 3.0 cm の 3 枚のアルミ板を物体として選び、受波器走査によって像を記録した。得られた像を図 9 に示す。実験の結果、分解能は走査の状態に左右されるものの、最悪の場合でも 1 cm 以下が得られることが判明した。これは、使用したマイクロ波の波長の約 1/3 にあたる。シャドウグラフィは物体の電波による影を映像化するため、シャドウグラムで分解能を向上させるには、受波器の開口を極力小さくし、さらに物体と受波器をなるべく近づけて影信号データを得る必要がある<sup>4)</sup>。この為に、受波器には導波管の端面に 2 mm×3 mm の開口を持ったアイリスを取付け、受波器—物体間の距離  $d_2$  を 1 cm 以内に保ち走査した。このように、電波、特にマイクロ波あるいはミリ波によるシャドウグラフィは、1 回の走査で直接像が得られ、さらに波長程度又はそれ以下の分解能を得ることも可能で、ホログラフィのように広い場所や複雑な演算を必要としないので、特殊な用途には充分実用になる映像法であると言える。

#### 4.2 遮蔽板走査方式によるマッピング

次に遮蔽板走査方式によるマッピングの実験を行った。実験では、送波器—物体間の距離  $d_1$  を 1.8 m とし、物体や遮蔽板による電波の回折を最小にする為に、物体を受波用ホーンアンテナの直前に置き、さらにその直前で銅板の小片の遮蔽板 (22 mm×22 mm) を走査した。従って図 2 の  $d_2, d_3$  は共に 0 cm である。物体として、バックグラウンド成分を減少させる為に銅板に切りぬいた文字 A (11 cm×10 cm, 文字の太さ 1.5 cm) を使用した。走査の様子は図 4 に示されている。遮蔽板の走査により得られた電波像を図 10 (a) に示す。この像には遮蔽板による回折、散乱の影響が顕著に現れており、良質の像とは言にくい。遮蔽板の材質を変えて実験を繰り返し、電波暗室などに用いられている電波吸収用の導電性スポンジ片が有効なものであることがわかった。銅板を用いた場合は、電波の強い場合に干渉効果が特に強く現れて不適當である。銅板と同じ大きさの吸収片をこの電波吸収材で作り、図 10 (a) と同一条件の走査を行って得た像を図 10 (b) に示す。この像では、以前に見られた遮蔽板による回折や散乱はいちじるしく減少し、良好な電波像が得られている。このように、この電波吸収材は、スポンジ製で加工が簡単であり、重量が非常に軽い為、この走査方式に好都合である。以下の実験では、全てこのスポンジ製吸収材を吸収片として用いているので、以後、吸収片走査方式と言うことにする。

次に、吸収片の大きさを変化させて電波像を得る実験を行った。吸収片を大きくした場合に得

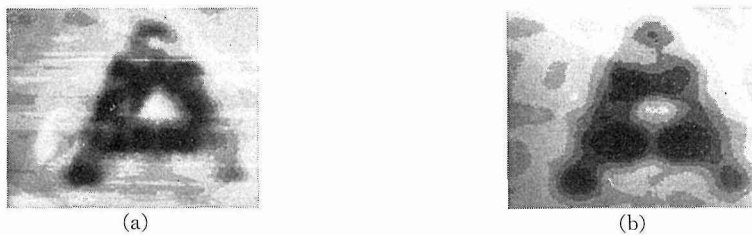


図 10 遮蔽板走査による像 (a) 及び吸収片走査による像 (b)



図 11 大きな吸収片の走査による像

図 12 小さな吸収片の走査による像

られた像を図 11 に示す。ここでは  $35\text{ mm} \times 35\text{ mm}$  の吸収片を使用した。この像では物体の形はかなり失われているが、コントラストははっきりしている。また逆に、吸収片を小さくした場合に得られた像を図 12 に示す。ただし、ここでは吸収片の大きさを  $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$  とした為に、吸収片で吸収される電力がごく少なく、コントラストの良い像が得られにくいので、4回同一の条件で走査を行い、その後サポートシステムで得られた4つの画像の平均を求めて表示している。このように、コントラストの低い画像に対し、像の質を簡単に向上させる処理として、平均化（アベレージング）は有効な方法であると考えられる。

図 11 及び図 12 に示される実験結果は、式 (1) に基づいたシミュレーション実験<sup>3)</sup>の結果とよく一致しており、小さな吸収片を走査することは、開口の小さな受波器を走査することに相当し、吸収片走査方式によっても、波長程度又はそれ以下の分解能の電波像が得られることを図 12 は示している。

さらに、簡単な画像処理の例として、図 13 に図 12 からソフトウェアによってネガポジ反転した像を示す。吸収片走査方式では、電場の強度はネガのイメージでマッピングされるが、本装置ではポジ・ネガ反転はリアルタイムで行うことができる。また、いわゆるウインドウ・コンパレータに相当する処理を行った像を図 14 に示す。ウインドウの上限及び下限はパラメータで指定され、この像では文字 A の輪郭が現れるようにセットされている。このように、本装置では、オンライン・リアルタイムで CRT イメージ・ディスプレイを見ながらパラメータや表示方式を変更して電波像を表示できるようになっている。その為、電波像データの収集及び表示の為にインテリジェント・ターミナルとして実用上有望な装置となっており、この点で、マイクロコンピュータの導入は大きな利点となっている。

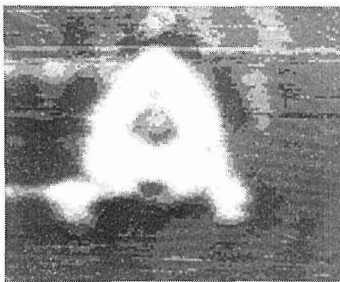


図 13 図 12 のポジ

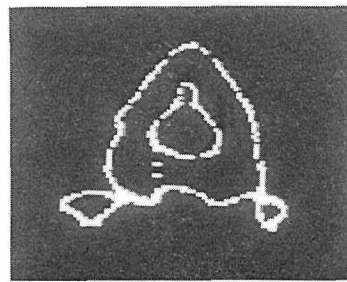


図 14 ウインドウコンパレータ処理の例

#### 4.3 しきい値処理法による像再生

吸収片走査方式で得られた像（コリログラム）から物体を再生する方式については、文献 (3) では、FFT を用いてコリレーションを解く演算が提案されているが、この方法は計算量が多く、演算も複雑であり、実際に用いるのはあまり得策とは言えない。また、吸収片をごく小さくすれば、コリログラムは物体とほぼ等しくなり、直接物体の像が得られるが、図 12 に示されるようにコントラストが減少し、良好な像が得られにくい為、小さくするにも限界がある。実験的に求められた値として、吸収片の面積は、物体の面積の約 400 分の 1 以上は必要であると推定される。この値は、走査の安定度や A/D 変換器の精度を含むシステム全体の総合的性能により決まる。

これらに対して、本論文で提案している像再生方法は、物体が金属等の電波を完全に遮断する性質を持っていて、かつ吸収片は物体の大きさより小さければ、物体はコリログラムからしきい

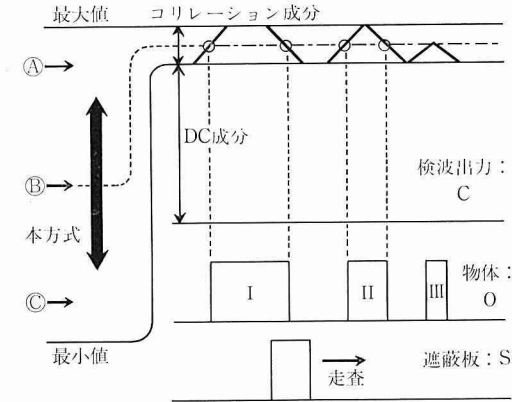


図 15 遮蔽板走査により記録される検波出力の1次元モデル

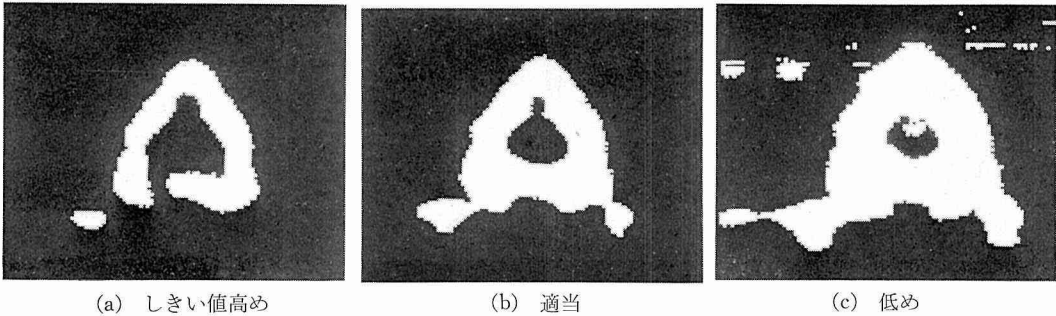


図 16 図 13 の 2 値処理像

値処理のみで再生可能であるという原理に基づくものである。ここで図 15 に式 (1) によって表される、遮蔽板走査による検波出力の1次元モデルを示す。図 15 において物体 I、物体 II を正しく再生するには、しきい値を ② の位置にすると良く、① では細く再生され、③ では太く再生され、正しい再生像とはならない。このようにしきい値を変化させて像を表示することは写真処理では困難であるが、本装置では、全てデジタルデータによる処理を採用しているので、簡単に実現できる。但し、実験では検波出力にはかなりゆらぎがあり、正確に DC 成分とコリレーション成分をわけられないので、しきい値 ② の値は、マイクロコンピュータにコマンドを与え、画像データの最大値、最小値、平均値を求めさせ、操作者が正しい値を推定し、表示を繰り返して、良い所を求めている。2次元の物体に対する吸収片の大きさの条件は、例えば文字物体の場合には、その文字の太さからなる正方形より小さいということではほぼ満足される。ここでは、条件を満足する実験データとして、図 13 に示すデータを用いた。図 16 (a) に高めのしきい値により表示を行った場合、図 16 (b) には推定された正しいしきい値により表示を行った場合、図 16 (c) には低めのしきい値により表示を行った場合の像をそれぞれ示す。これらの像から、本論文で提案しているしきい値処理法による像再生は正しく行れることが確かめられ、コリレーションによって生じる分解能の低下を容易に防止できるようになった。

#### 4.4 実際への応用

実際の映像化への応用として吸収片走査方式による不透明媒質内の金属物体の映像化及び、ホーンアンテナの開口の映像化の実験を行った<sup>5)</sup>。

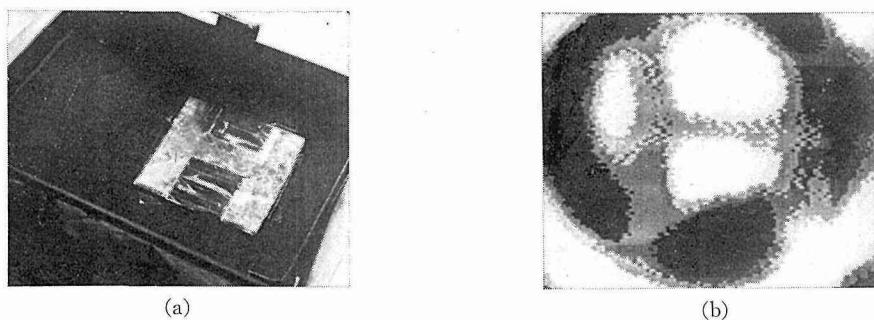


図 17 銅板の物体 H (a) およびそのマイクロ波像 (b)

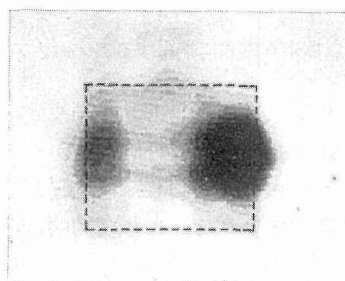


図 18 ホーンアンテナ開口像

まず物体として図 17 (a) に示す黒い厚紙の箱に入った銅板 H (12 cm×12 cm, 太さ 3 cm) を用いた。実際の配置は図 2 において  $d_1=1.8$  m,  $d_2=10$  cm,  $d_3=0$  cm で、吸収片は 22 mm×22 mm のものを用い、32 cm×32 cm の範囲の走査を行った。図 17 (b) に得られた電波像を示す。この像には、受波器と吸収片が離れておかれている為に吸収片のフレネル回折パターンが文字 H と同時に記録されており、良好な像とは言えないが、しかし金属物体の形をほぼ映像化することが可能であると考えられる。

次に、マイクロ波用ホーンアンテナの開口の可視化の実験を行った。吸収片を受波用ホーンアンテナの開口の前面で走査し、2.4 m 離れた固定の送波用ホーンアンテナから電波を発射した。可視化された開口を図 18 に示す。この像には、ホーンアンテナの開口での電力分布が可視化されているが、同時に吸収片の回折パターンも重なっており、正しい分布像とはなっていないが、ある程度までは開口が判定可能であろうと考えられる。図 18 において、実際のホーンアンテナの開口部分は点線で示される、15 cm×11 cm の長方形である。

## 5. 検 討

本論文では、吸収片走査方式による電波映像法を提案し、それにより得られたコリレーション・パターンから簡単に像を得る新しい方式であるしきい値処理法を提案し、実験的に確かめている。これらの実験の結果、吸収片走査による電波映像法は、十分な分解能を持ち、処理も容易であるため、実用的な映像法としての可能性を持っていると言える。特に、しきい値処理法による像の再生は、本装置のような、バッファメモリ内に画像データをストアし、表示のパラメータや表示方式を変更することにより、CRT イメージ・ディスプレイ上の像が即座に変化し、最良の像を見いだすことができるという、オンライン、リアルタイムのデジタル処理システムにおいてはじめて可能となることであり、ソフトウェアによる非線形の処理、非線形のサンプリング

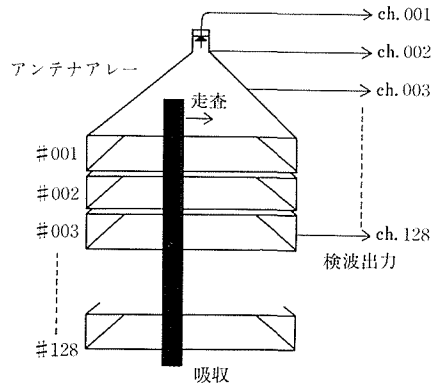


図 19 吸収棒走査方式に採用するアンテナアレーの例

の可能性も含めて、マイクロコンピュータ導入の大きな利点となっている。ただし、吸収片走査方式のマッピングは、本来走査方式であるために時間がかかることがあげられるが、本装置では、パルスモータをマイクロコンピュータで制御し、高速・高精度の走査が実現されており、走査に従って準実時間で像が観測可能であるので、大きな問題にはならない。さらにアレー技術を用いるとすれば、図 19 に示すような細長い開口を持つアンテナを積み重ねて固定しておき、吸収棒を走査する方式が考えられる。この方式を用いれば、コスト高になるが、1回の走査で2次元のマッピングが可能となる。特にマイクロ波帯においては、アレーの走査よりも吸収棒の走査の方がはるかに容易となるので、本方式の走査はますます有利となる。

しかし、コヒーレントな波動を用いた映像系では、シャドウグラムの作成時に、物体と受波器が離れている場合や、吸収片走査において、物体と吸収片と受波器が離れている場合には、物体や吸収片の回折波には干渉じまが生じ、良好なシャドウグラムが得られない。特に実際のセットアップによっては、受波器を物体に近づけられない場合も考えられ、単に物体の影をとらえる方式の問題点となってくる。この点の解決方法として次の3つが考えられる。

- (1) 吸収片や物体による回折波を積極的に利用し<sup>2)</sup>、マイクロ波ホログラムを作製し、光<sup>6)</sup>又は計算機<sup>7)</sup>による処理で物体の像を再生する方法。
- (2) これとは逆に、電波に対する位相板、拡散板などを使用し、コヒーレンスを落し、干渉効果を減少させて影を記録する方法<sup>8)</sup>。
- (3) 画像の差の演算や周波数面でのフィルタリングなどのデジタル画像処理を行い、画像から干渉じまを除去する方法。

方法 (1) については、各方面で研究が進んでいるが、方法 (2) については、マイクロ波領域においては確立した方式が無いようであり、今後の研究が期待される。方法 (3) については、現在ソフトウェアを開発中であるため、実験は行っていないが、画像の差を求める演算が有効であろうと推定される。これについては今後の研究課題としたい。

また、吸収片走査方式によって得られる実際の電界強度信号データは、大きな DC 成分に非常に小さな像信号 (コリレーション) 成分が重畳したものとなるため、この小さな変化を充分にとらえるには、走査装置、増幅回路、A/D 変換器等、システム全体の精度、安定度を増すことが、基本的性能としてますます重要となるものと思われる。

## 6. む す び

マイクロコンピュータ制御，デジタル処理による電波映像システムの試作を行った。このシステムによって，ソフトウェア・プログラマブルな電界データ収集を行い，準実時間でCRTディスプレイ上に電波像を得ることが可能となった。これらの電波像から，受波器走査，物体走査及び本論文で提案した吸収片走査の各走査方式によって波長程度またはそれ以下の分解能のシャドウグラムが得られることが判明した。また，簡単な画像データ処理によって像の質や分解能が向上することも確かめられた。この映像法はマイクロ波の映像法としてはその応用分野に限られるが，実験結果から充分実用になる映像法であると考えられる。

## 文 献

- 1) 岩崎 俊，青木由直，鈴木洋一：電子通信学会論文誌 (B)，55-B (1972)，2，pp. 67-68.
- 2) 青木由直：応用物理，45 (1976)，10，pp. 943-949.
- 3) 鈴木洋一，青木由直：昭和52年度電気四学会北海道支部大会予稿集，p. 189.
- 4) 青木由直：工学部研究報告，第87号，pp. 135-145 (昭53-06).
- 5) テレビジョン学会編：“不可視情報の画像化”，p. 247，昭晃堂 (1979).
- 6) Y. Aoki: Applied Optics, 6 (1967), 11, pp. 1943-1946.
- 7) 青木由直，鈴木洋一，石塚滋樹，岩崎 俊：電子通信学会論文誌 (C)，58-C (1975)，2，pp. 71-78.
- 8) T. Sato and S. Wadaka: J. Acoast. Soc. Am. 58 (1975), 5, pp. 1013-1017.