

# 欠陥面積率測定機能付超音波探傷装置

## Automatic Ultrasonic Testing System with Flaw Area Percentage Indicator

日立製作所は、タービン発電機や核融合装置での電気巻線のろう付接合面の超音波検査の自動化により、欠陥面積率(探触子の走査面積に対する欠陥の占める面積の比)を自動的に計測する機能をもつ自動超音波探傷装置を開発した。

この装置はマイクロコンピュータの使用により、自動、手動いずれの探傷法でも、ろう付面の欠陥の分布、形状の映像化及び欠陥面積率の自動測定が可能である。ろう付試験片を使用した性能試験を実施し、その結果をX線透過試験及び破壊試験の結果と比較し、次に述べる結論を得た。(1) この装置は従来の手動探傷法に比べ、検査効率が大幅に向上した。(2) X線法では検出できない多数の、大きさ $0.02\sim0.04\text{ mm}$ のボイドから成る接合不良部を超音波像として映像化でき、超音波による高感度な探傷が可能であることが分かった。

鈴木一道\* Suzuki Katsumichi  
金森隆裕\*\* Kanamori Takahiro  
七井 勇\*\*\* Nanai Isamu  
鈴木雅晴\*\*\* Suzuki Masaharu

### 1 緒 言

タービン発電機や核融合装置などのコイル接続部には、ろう付による接合が多く用いられている。これらの装置の信頼性を確保するためには、接合部の健全性を確認することが不可欠である。ろう付部の健全性確認には超音波探傷法が最も有効な検査法であるが、従来の方法は手動によるものであった。手動超音波探傷法では、探傷範囲各点での欠陥信号の大きさとその発生位置の記録、記録データの分析という過程をへて、接合不良部の分布、大きさなどを手作業により求めていた。このため、検査時間の製造工程に占める割合が大きくなり、また、検査員の個人差によるデータのばらつき、熟練検査員の確保などが問題となっていた。そこで検査を自動化し、接合不良部の分布、接合面積に対する割合(欠陥面積率)を即座に算出する装置を開発し、検査作業の標準化、合理化を図ることにした。

以上のような観点から、この論文では、マイクロコンピュータを応用した欠陥面積率の自動測定法を中心に、開発した自動超音波探傷装置の機能及び試験結果について述べる。

### 2 欠陥面積率の測定法

図1(a)に示すように、接合面にボイドなどの接合不良部をもつ被検査試料の表面を、超音波探触子で方形走査した場合を考える。同図(b)は、同図(a)の探傷条件で得られる欠陥のCスコープ<sup>※1)</sup>像をブラウン管(CRT)面上に表示したものである。同図(b)のCスコープ像中、太い実線で示した走査線は超音波探傷器が欠陥エコーを検出し、輝度信号をCRTに出力したことを表わしている。

この論文で述べる欠陥面積率は、図1(b)でのCスコープ像の輝度信号を受けた走査線長の総計の、超音波探触子の走査

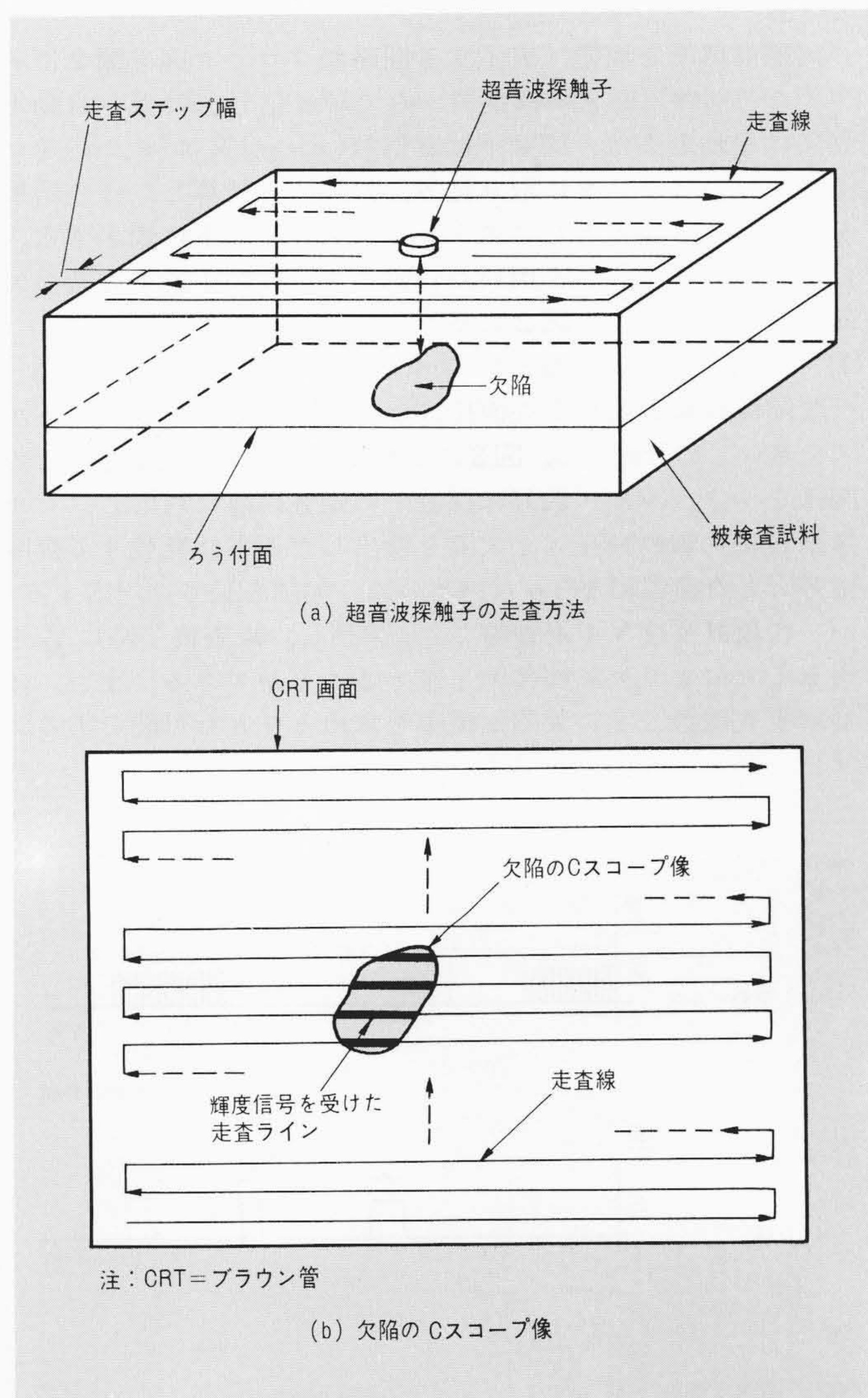


図1 超音波探触子の走査方法とCRTに表示された欠陥のCスコープ像 探触子を方形走査し、欠陥部だけをCスコープ像としてCRTに表示する。

※1) Cスコープ：超音波の進行方向に直角な面を画像表示する表示方式をいう。超音波進行方向を含む面を画像表示する方式をBスコープという。一方、Aスコープは横軸を時間、縦軸を反射波信号の振幅にして信号を表示する方式である。



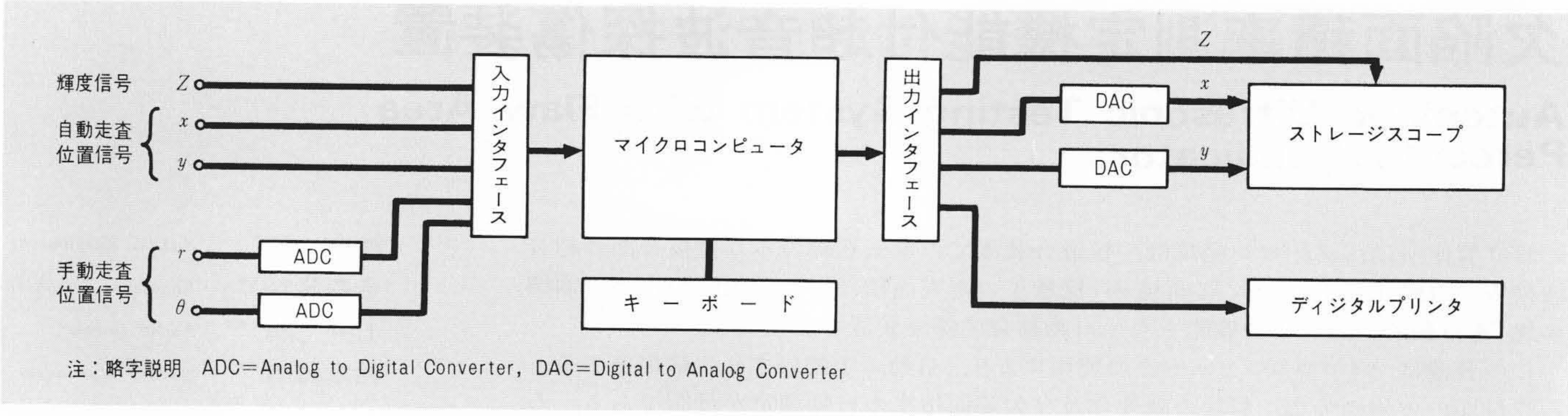


図2 欠陥面積率測定回路のブロック図      マイクロコンピュータの利用により、手動、自動いずれの場合にも欠陥面積率、欠陥像を即座に得ることができる。また、探傷条件も表示できる。

線長の総計に対する比率と定義する。ここで、同図(a)での走査ステップ幅を超音波ビームの幅よりも狭くすれば、上述の比は欠陥像の面積  $D$  に対する走査面積  $S$  の比とみなせる。したがって、 $D$  及び  $S$  を測定すれば欠陥面積率を求めることができる。

欠陥面積率を測定、表示する回路のブロック図を図2に示す。この回路は超音波探傷器からの輝度信号 ( $Z$ ) 及び自動走査又は手動走査時の探触子位置信号 ( $x, y$ ) 又は ( $r, \theta$ ) をマイクロコンピュータに取り込み、欠陥率を計算し、その結果をCスコープ像とともにストレージスコープ上に表示する。以下、パルスモータを用いた自動走査、及び手動走査時の欠陥面積率の測定法を図2に基づいて述べる。

(1) 自動走査の駆動源としてパルスモータを使用する場合

欠陥像面積  $D$  及び走査面積  $S$  は、パルスモータ駆動用パルスに基づいて計測する。図3に駆動用パルスと輝度信号  $Z$  との関係を示す。パルス数  $M$  は探触子の走査距離に対応し、パルス数  $N$  は、駆動パルスと欠陥を検出したときに発生する輝度信号  $Z$  との論理和をとったパルスで、欠陥の長さに対応する。パルス数  $M$  及び  $N$  を走査線ごとに累積し、走査終了時に  $\frac{N}{M}$  を得ることにより欠陥面積率を求めることができる。また、任意の走査線数ごとに欠陥面積率を求めることも可能である。

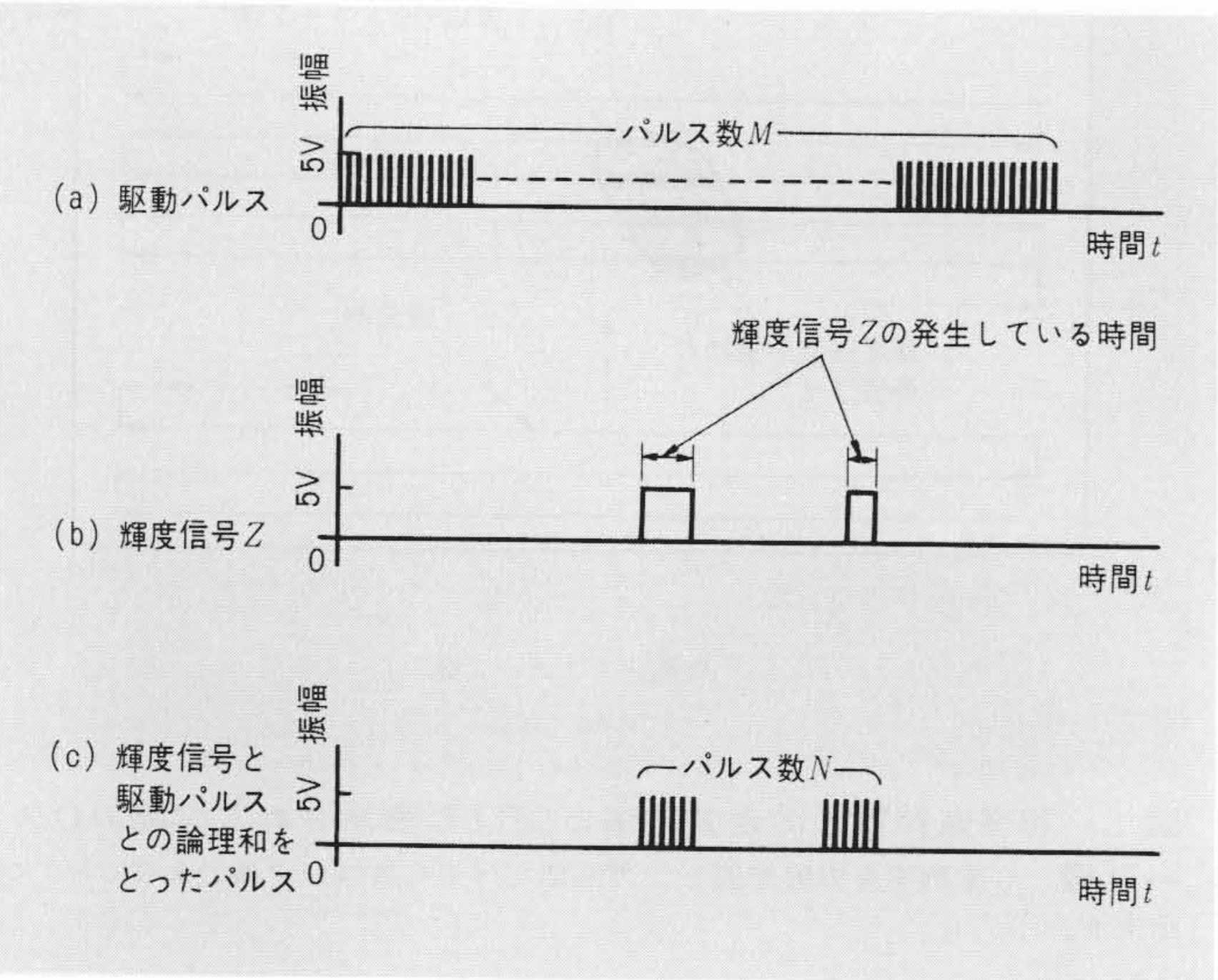


図3 パルスモータ駆動パルスと輝度信号の関係      欠陥を検出したとき発生する輝度信号と駆動パルスの論理和をとることにより、欠陥の長さをパルス数  $N$  で表わせる。

(2) 手動走査時の欠陥面積率の測定

検査対象物あるいは検査場所によっては、探触子走査の自動化が困難な場合がある。この場合にも、探触子の位置を電氣的に検出することにより、手動走査時の欠陥面積率を求めることができる。

手動走査は自動走査の場合のように規則的な走査ではなく、いわゆるランダム走査である。したがって、ある探傷範囲を

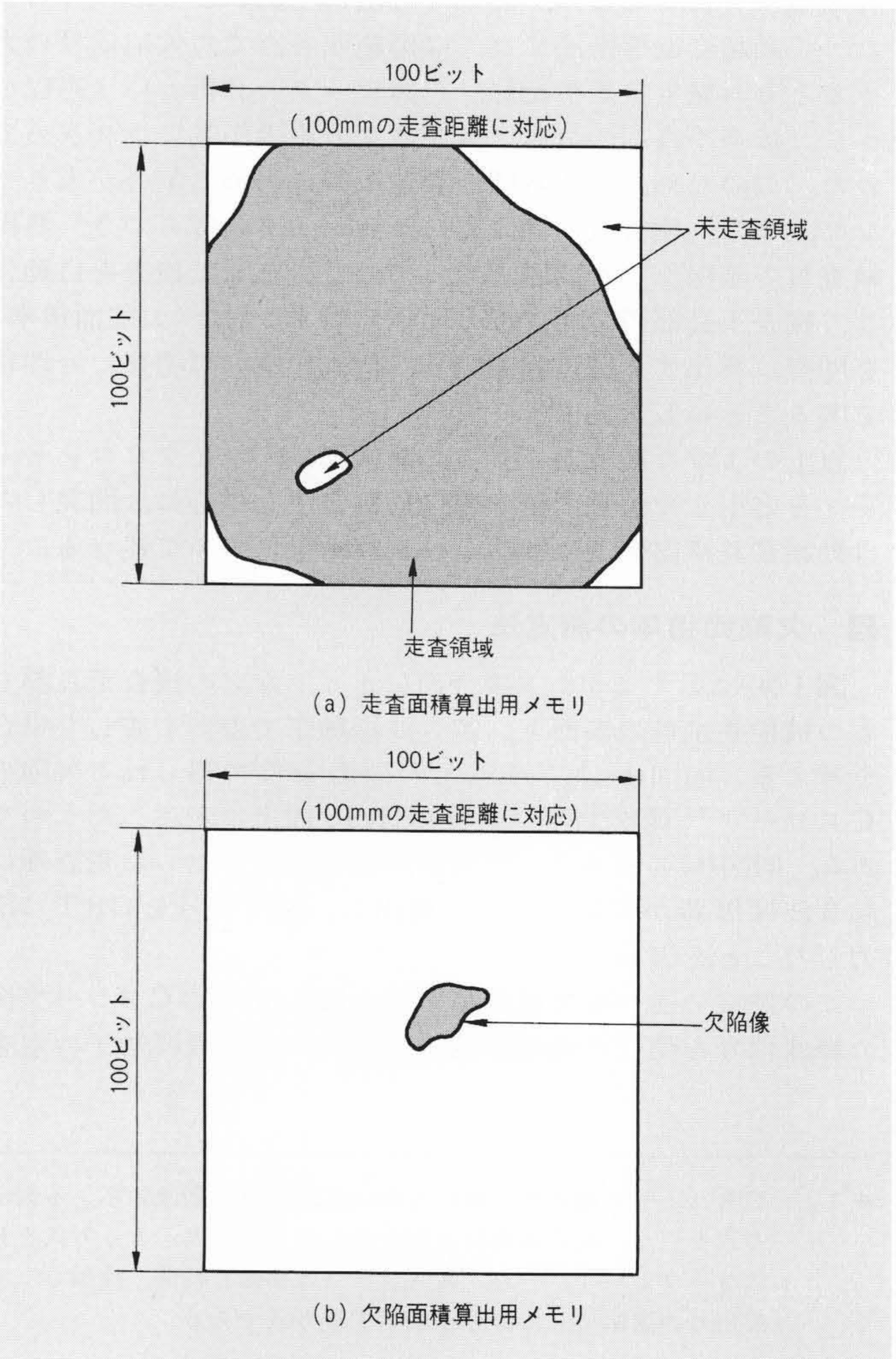


図4 手動探傷時のメモリセルの状態      2領域のメモリを用意し、それぞれ走査済みの部分及び欠陥像に対応した部分に“1”を書き込むことにより、探傷後欠陥面積率を求めることができる。



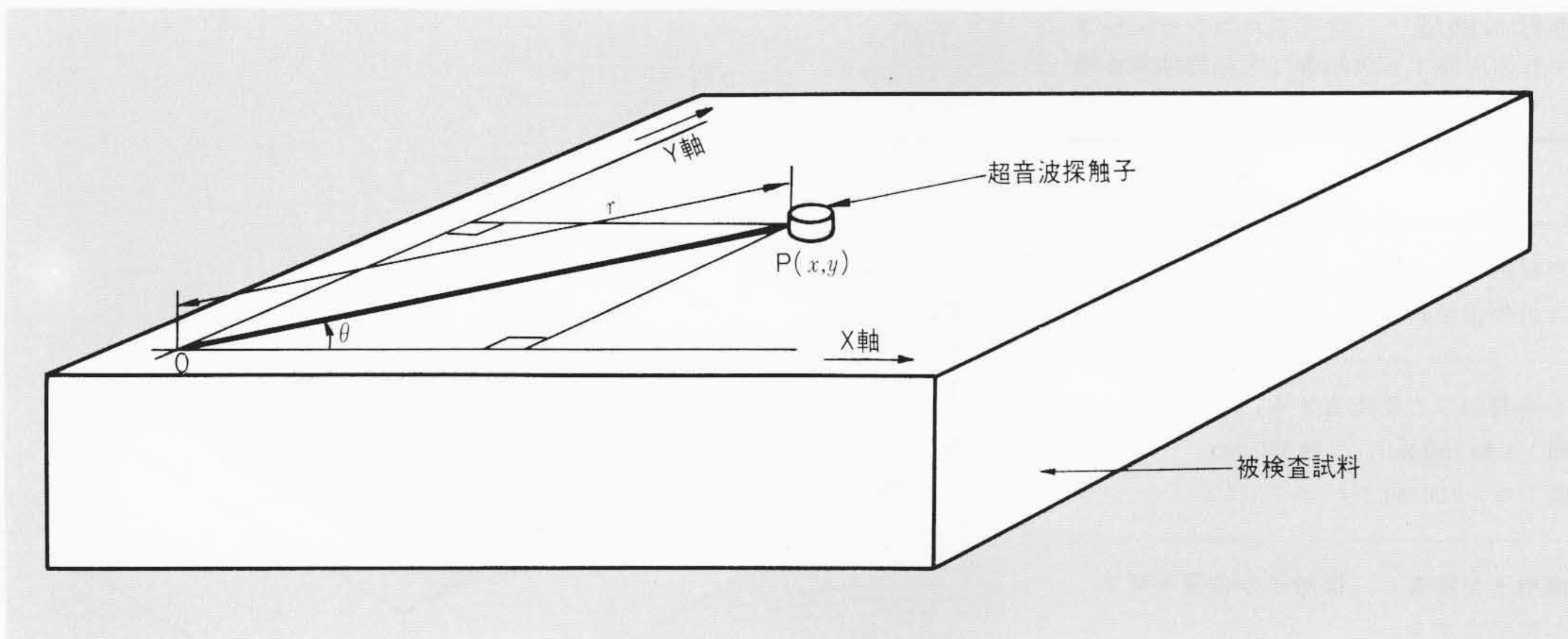


図5 手動探傷時の探触子位置の検出方法 極座標  $(r, \theta)$  により探触子位置  $(x, y)$  を表示する。極座標から直角座標への変換はマイクロコンピュータで行なう。

設定した場合でも未走査領域が生じ、正確な走査面積を求めることができない。この問題を解決するため、この装置ではマイクロコンピュータに10kビットのメモリ領域を2箇所用意した。第1の領域は探触子が走査した領域に対応するメモリセルに“1”を書き込み、走査範囲を表示する。第2の領域は、欠陥像を表示する目的に使用し、探傷器からの輝度信号により、欠陥の位置に対応したメモリセルに“1”を書き込む。図4に、走査領域及び欠陥像に対応したメモリセルの状態の一例を示す。探傷終了後、両メモリ領域内の“1”が書き込まれているメモリセル数を計数し、両者の比をとれば欠陥面積率を求めることができる。

探傷中、マイクロコンピュータはメモリ内容を読み出し、ストレージスクリーン上にメモリの状態を表示する。したがって、検査員はどの程度未走査領域があるかをモニタし、未走査領域を埋めることができる。また、探傷途中でも外部スイッチにより、欠陥像をストレージスクリーン上に表示できる。

この装置では、手動走査の領域を100mm×100mmと限定した。この結果、1ビットは走査距離1mmに対応する。この値は通常の手動探傷を実施した場合と比較すると十分な値である。

図5は、探触子の位置を検出するための装置の原理図である。原点  $O$  を固定し、原点から探触子までの距離  $r$  及び  $X$  軸と  $OP$  とのなす角  $\theta$  を測定することにより、探触子の位置  $(x, y)$  を求めることができる。極座標系から直角座標系への変換はマイクロコンピュータで実施する。

### 3 自動超音波探傷装置の構成

自動超音波探傷装置の全体構成を図6に、装置の外観を図7に示す。また、装置の各構成機器の概略機能を表1に示す。

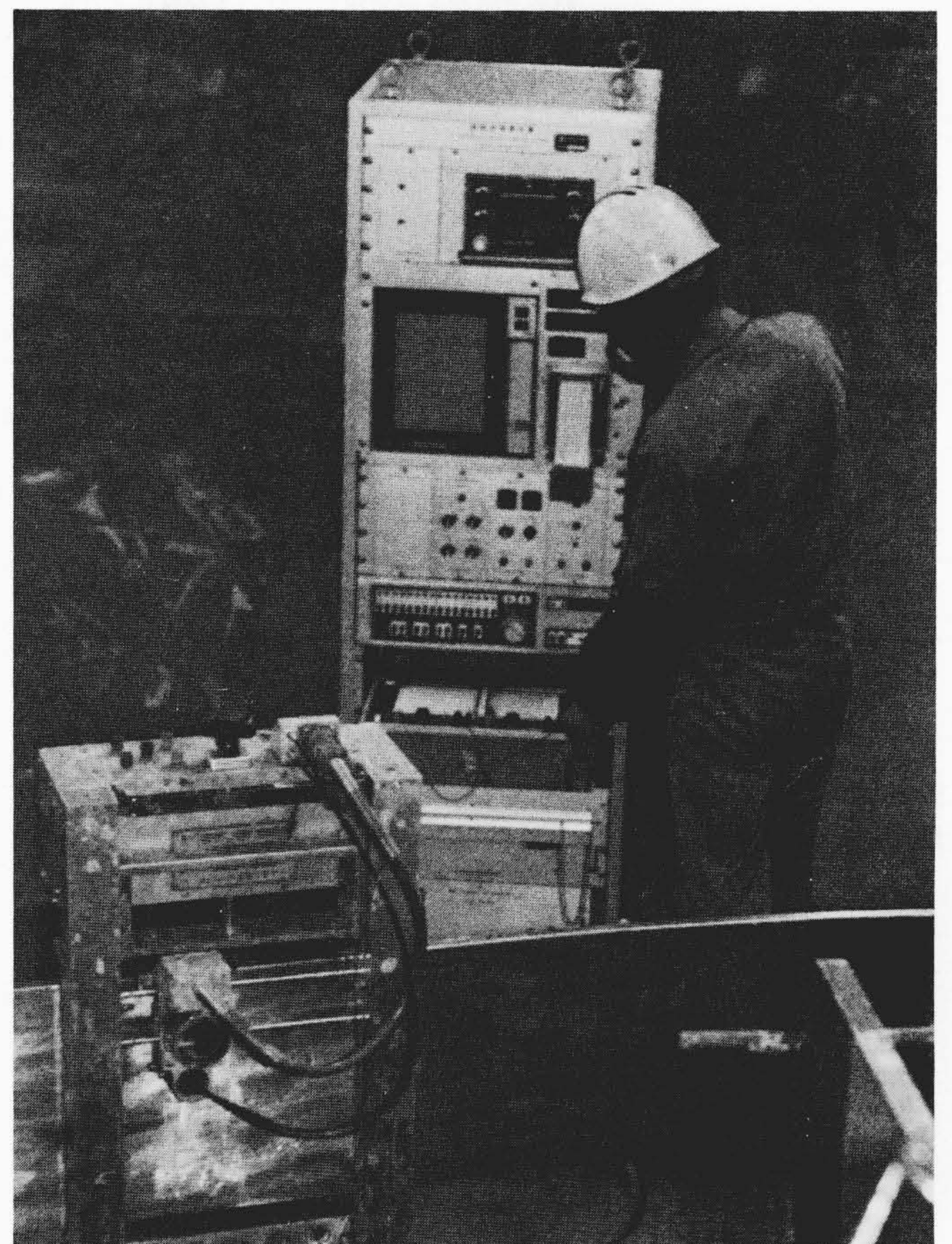


図7 超音波探傷装置の外観 自動走査装置によりコイル接合部を探傷している例を示す。Cスコープ像、欠陥面積率が自動的に得られる。

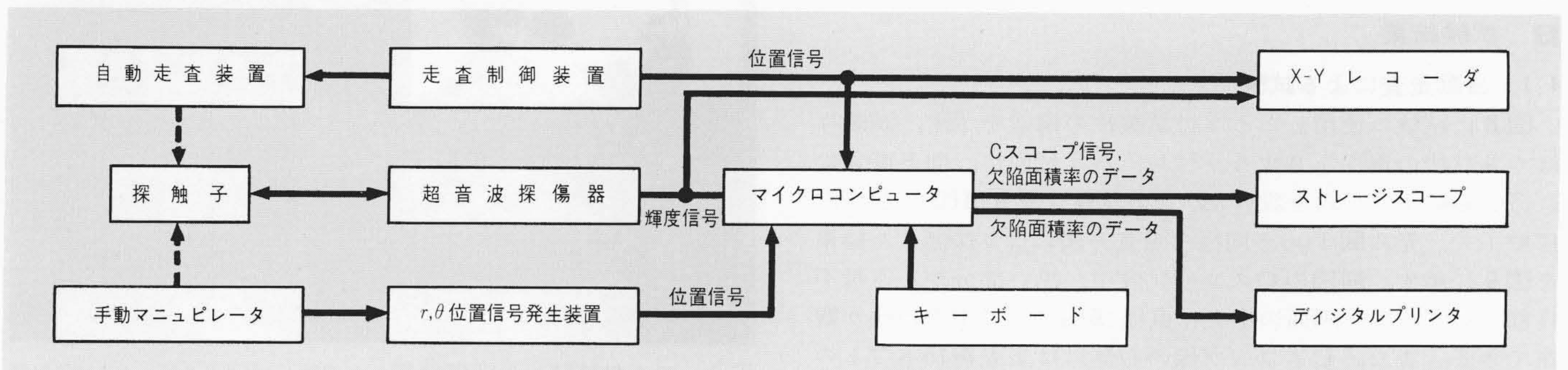


図6 欠陥面積率測定機能付超音波探傷装置のブロック図 検査結果はストレージスクリーン上に実時間で、探傷条件とともに表示される。



表1 自動超音波探傷装置構成機器の機能      マイクロコンピュータを使用することにより、自動、手動いずれの探傷でも欠陥像、欠陥面積率を得ることができる。

| 構成機器名                    | 機能                                                          |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 探触子                      | 2分割形探触子を使用し、超音波の送信及び欠陥信号の受信を行なう。周波数：5MHz                    |
| 自動走査装置及び走査制御装置           | 探触子を自動的に方形走査する。<br>走査範囲：X軸150mm、Y軸350mm<br>速度：0～100mm/s     |
| 手動マニピレータ及び(r, θ)位置信号発生装置 | 手動で探触子を走査し、探触子の位置を電気信号として出力する。<br>走査範囲：150mm×150mm          |
| 超音波探傷器                   | 超音波信号を送受信し、ゲート回路により欠陥信号を抽出する。その結果をCスコープ信号及び走査グラフ用信号として出力する。 |
| マイクロコンピュータ               | 欠陥面積率の演算、Cスコープ像の表示、極座標から直角座標への変換などを実行する。                    |
| キーボード                    | 検査日、被検体番号など探傷条件を入力する。                                       |
| X-Yレコーダ                  | 欠陥信号の走査グラフを表示する。                                            |
| ストレージスコープ                | Cスコープ像、探傷条件及び欠陥面積率の表示をする。                                   |
| デジタルプリンタ                 | 探傷条件、欠陥面積率を印字する。                                            |

この装置はマイクロコンピュータを内蔵し、自動探傷、手動探傷いずれの場合にも欠陥形状、分布を映像(Cスコープ像)として表示し、同時に欠陥面積率も測定表示することができる。また、欠陥面積率はデジタルプリンタにも印字が可能である。欠陥面積率は、自動走査の場合は16本あるいは32本の走査線ごとの値及び合計の値を欠陥像の横に表示する。手動の場合は走査面積内の欠陥面積率を表示する。更に、検査結果の整理を容易にするため、検査日、被検体番号などをキーボードから入力し、探傷結果と同時に表示する。

この装置はまた、X-Yレコーダにより走査グラフを記録することができる。Cスコープ表示は設定レベル以上の欠陥信号を検出し、その結果をON-OFF表示するが、走査グラフ表示は、欠陥信号をすべてアナログ表示する。したがって、欠陥エコーの大きさが表示され、欠陥の大きさを推定する際の精度向上を図ることができる。

4 試験結果

4.1 自動走査による試験

図8に試験に使用したろう付試験片の構造を示す。試験片はくさび状の銅片を2枚ろう付し、ろう付面に、面と直角に直径16mmのドリル穴を設けた。この試験片を5MHzの超音波探触子で、先の図1(a)と同様な走査方法により探傷した結果を図9に示す。同図のCスコープ像中、黒い部分がろう付不良部に対応する。画面の中央に直径16mmのドリル穴の像が観察できる。また、Cスコープ像の右側には走査線16本ごとの欠陥面積率と全走査面積に対する欠陥面積率(40.4%)、及び検査日、検査番号などの探傷条件が表示されている。

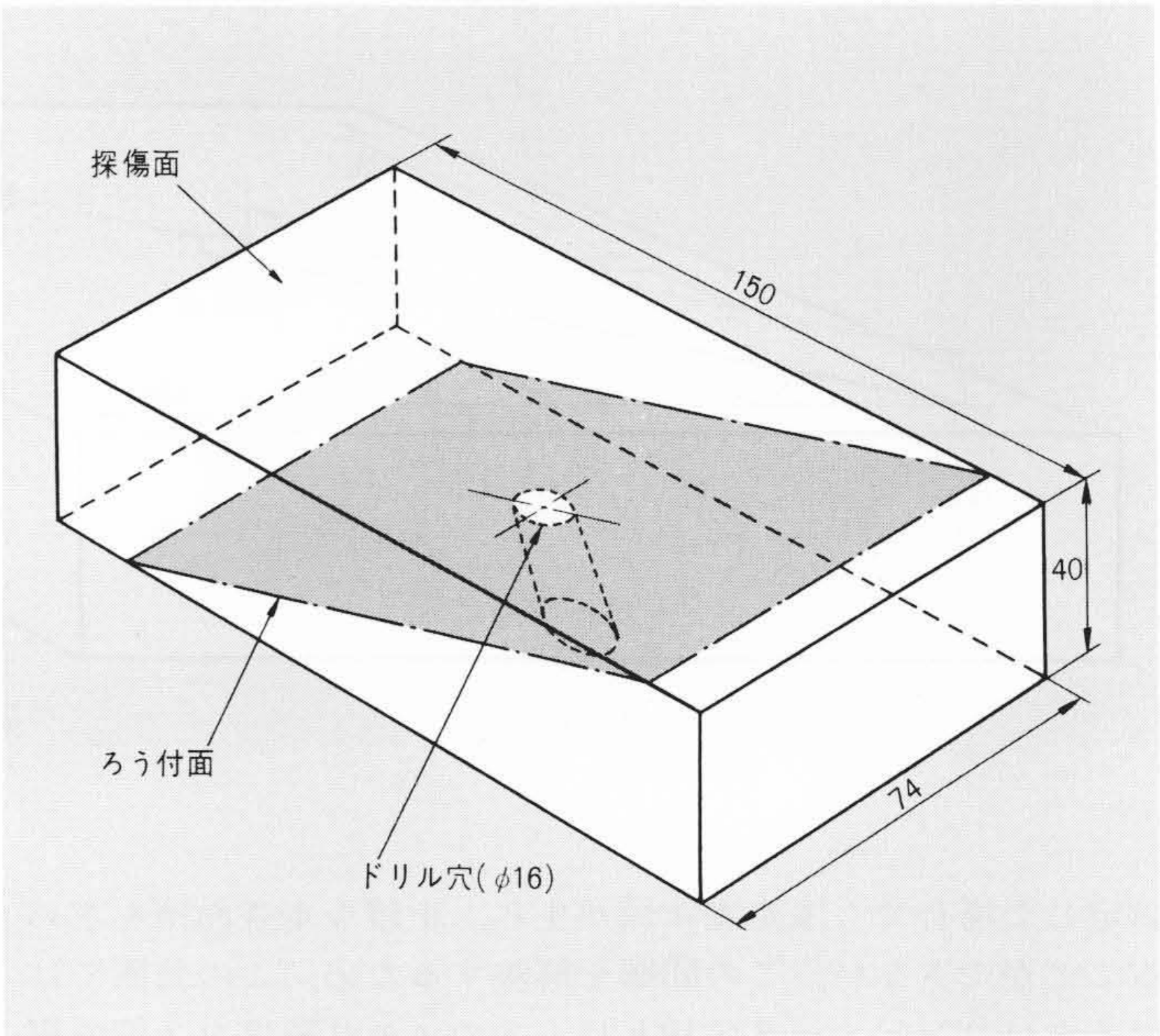


図8 ろう付試験片の構造      くさび状の銅ブロックをろう付し、ろう付面に直角に直径16mmのドリル穴を設けた。

探傷後、試験片をろう付面を中心に5mmの厚さに切り出し、X線透過試験により検査した。検査結果を図10に示す。同図はX線フィルムに現われた像をスケッチしたものであり、ろう付不良部は実線で示したように線状に表示されている。同図の点線は図9のCスコープ像をスケッチしたものである。同図から分かるように、X線像はCスコープ像にほぼ含まれているが、X線像は線状に表示され、Cスコープ像は面で表示されている。この差はX線検査の検出感度によるものと推定される。5mm厚さの銅材の場合、その検出限界は最適条件下でも厚みの1.5%程度である。したがって、板厚方向のろう付不良部の大きさが約0.08mm以上ないとX線透過試験による検出は困難である。このことを確認するため、ろう付層の断面を顕微鏡で観察した。

図11は、図10中の▲印の点A及びBでの断面の顕微鏡写真である。点AはX線、超音波いずれでもろう付不良部を検出できた場所であり、点Bは超音波では検出できたが、X線では検出できなかった場所である。図11から、点Bのように、0.02～0.04mm程度の微小なボイドから成るろう付不良部が連

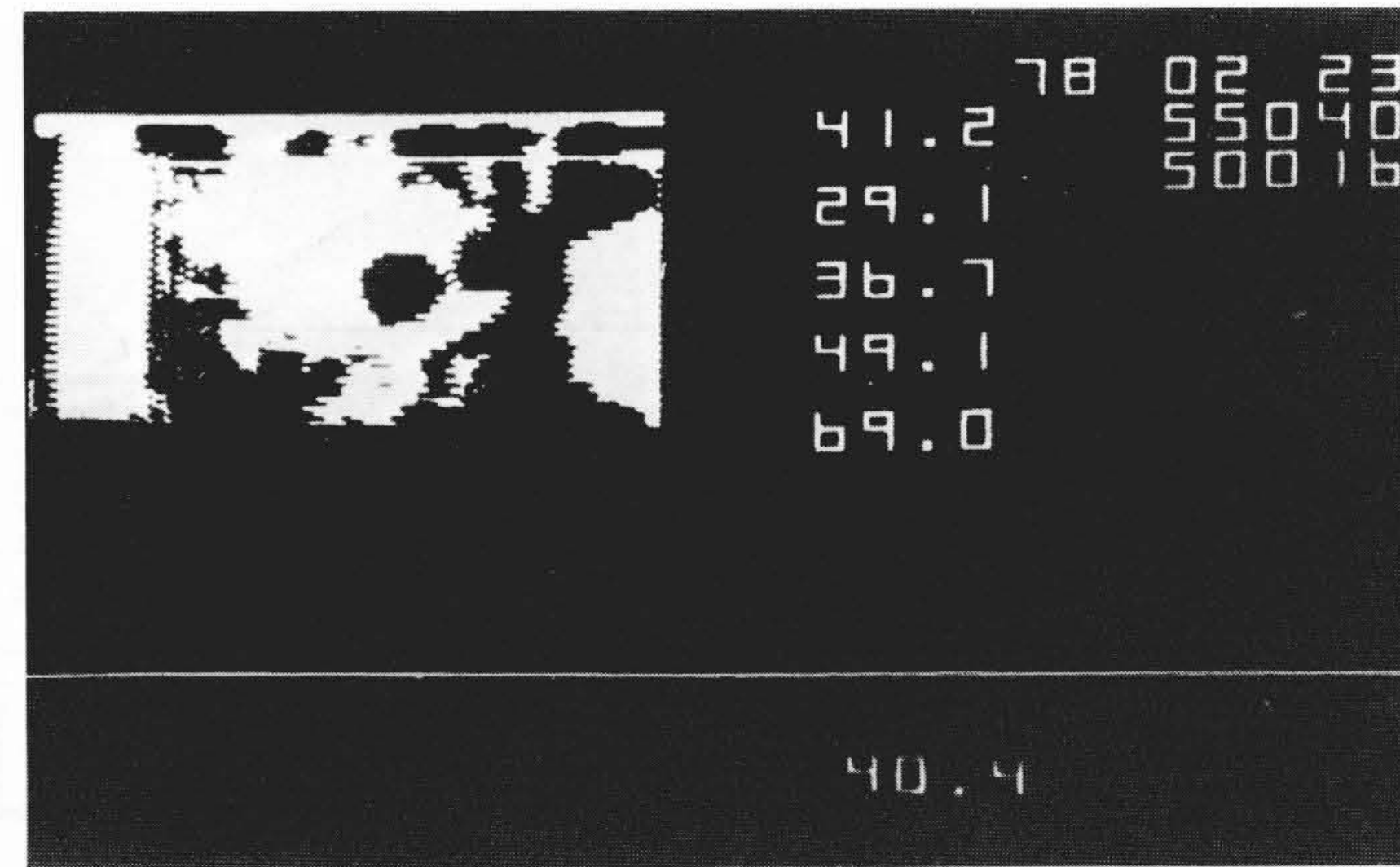


図9 ろう付試験片の探傷結果      直径16mmドリル穴とろう付不良部のCスコープ像及び走査線16本ごとの欠陥面積率、全欠陥面積率(40.4%)が表示されている。



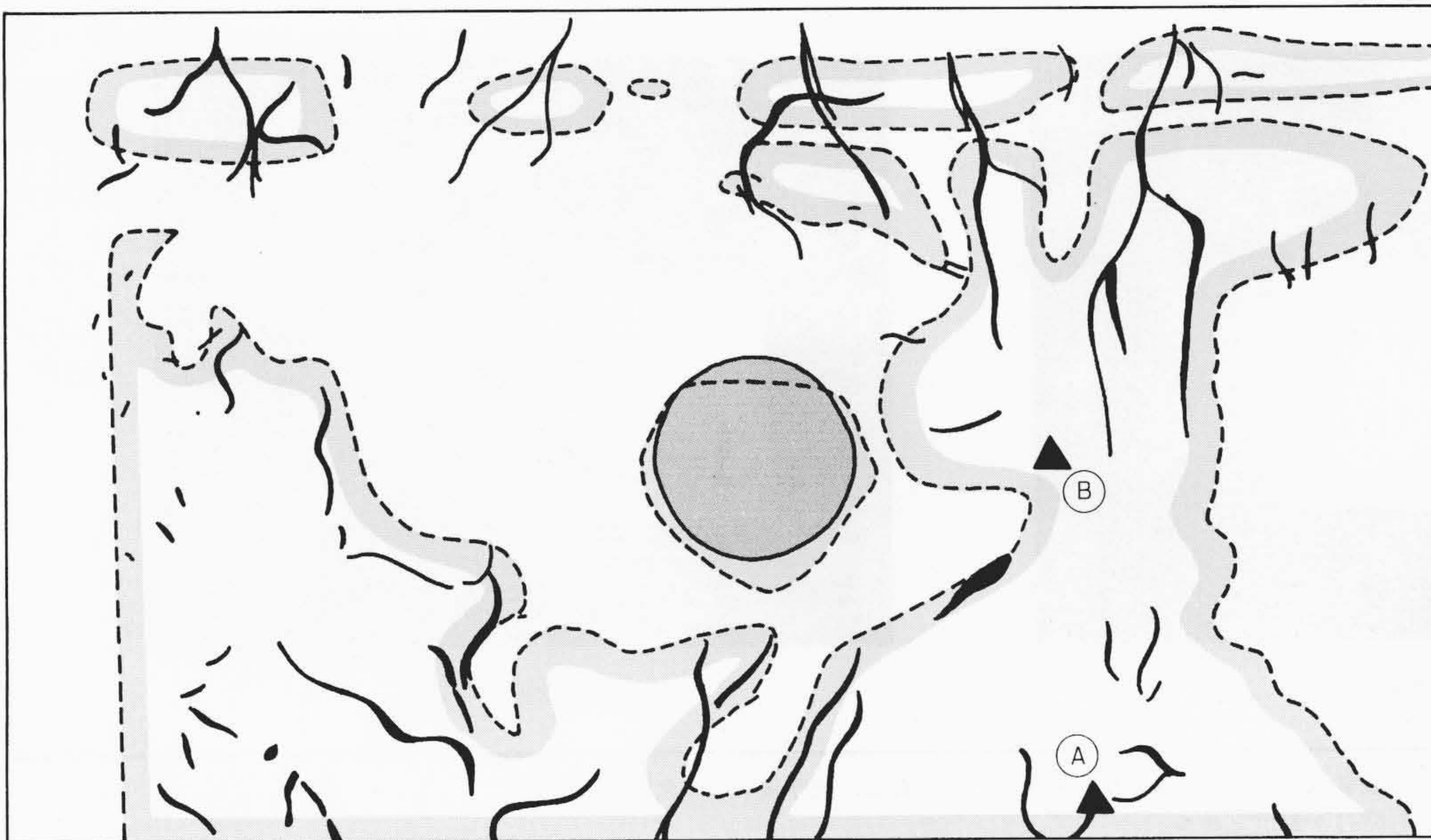


図10 ろう付試験片のX線透過試験の結果(スケッチ)

X線像(実線)は、超音波像(点線)にほぼ含まれている。点A及びBの部分を顕微鏡により観察した(図11参照)。

続している場所はX線像として検出できないが、超音波では、あたかも連続した欠陥であるかのように表示できることが分かる。一方、点Aのろう付不良部の大きさは約0.08mmであり、X線、超音波の両方によって検出されている。

図8に示した試験片と同様な試験片14個について超音波探傷試験と、そののちろう付面に沿って5mm厚さに切り出した試験片についてX線透過試験を実施し、欠陥面積率を比較した。その結果、超音波はX線に比較し、2～10倍大きな値を示しており、両者による試験時の材料の厚さの差を考慮に入れると、超音波試験はX線透過試験に比べ、高感度の探傷ができることが分かった。

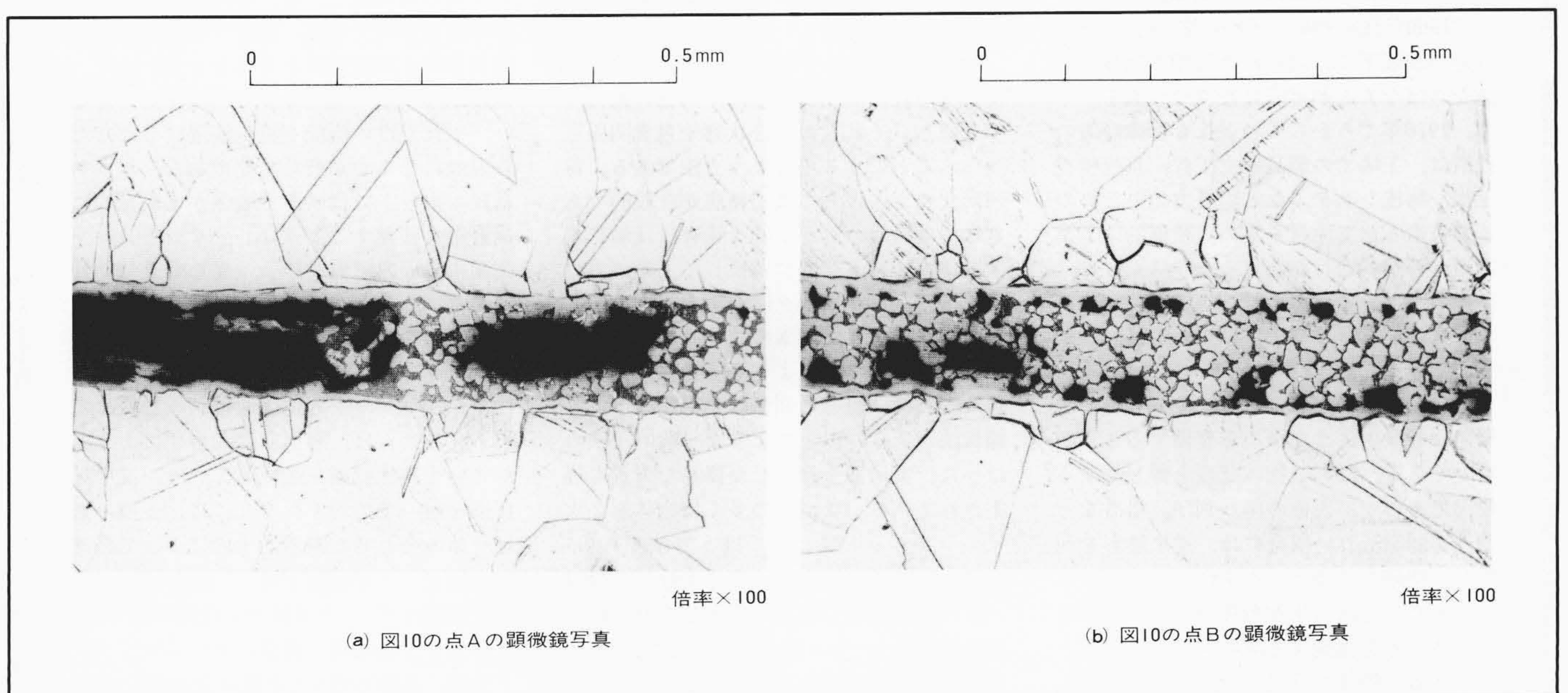
自動超音波探傷装置による検査時間は、走査装置の速度によってほぼ決定される。今回の試験では、走査速度を20mm/sから100mm/s、走査ピッチを0.5～1mmまで各々変化させて試験した。その結果、探傷能率と機械的な安定性を考慮す

ると、走査ピッチ1mm、走査速度60mm/sが最適な条件であった。この場合の図8に示した試験片の探傷時間は数分であり、実時間で欠陥面積率、欠陥像を得ることができた。この結果、従来の手動探傷に比較し検査効率を大幅に向上することができた。

#### 4.2 手動走査による試験

12.5mm厚の銅板の中心に設けたろう付面を、先の図5に示した原理に基づく手動マニピレータで走査し、探傷した。図12にその結果を示す。同図(a)の白枠は100mm×100mmの走査範囲に対応し、枠内の白い部分は走査した範囲を示す。同図(b)は探傷結果を示したものであり、黒い部分がろう付不良部を示す。また、走査した範囲での欠陥面積率(43.0%)が図の右下に示されている。

このように、手動走査の場合でも欠陥像を実時間で得ることができ、また欠陥面積率も同時に得られることが分かった。

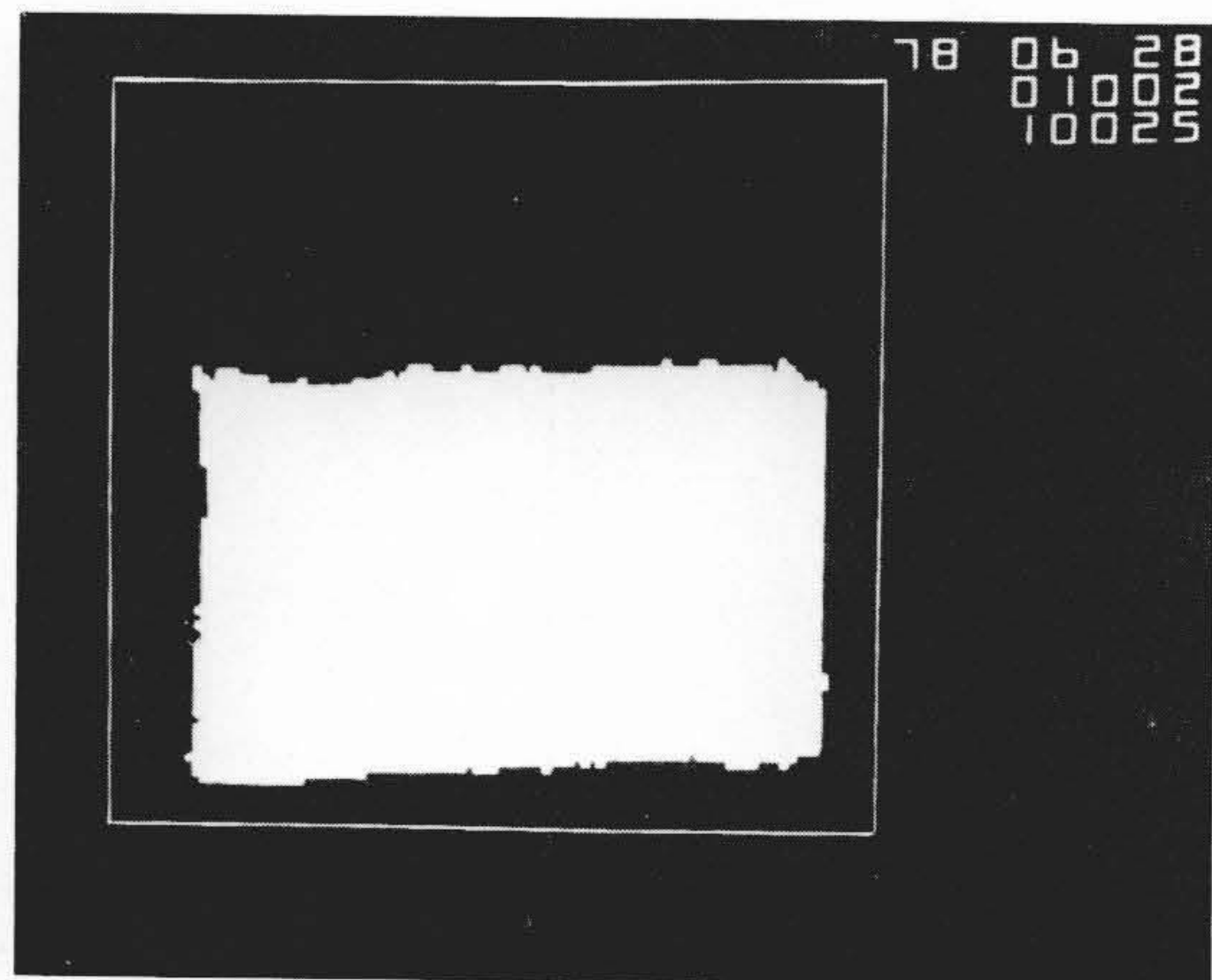


(a) 図10の点Aの顕微鏡写真

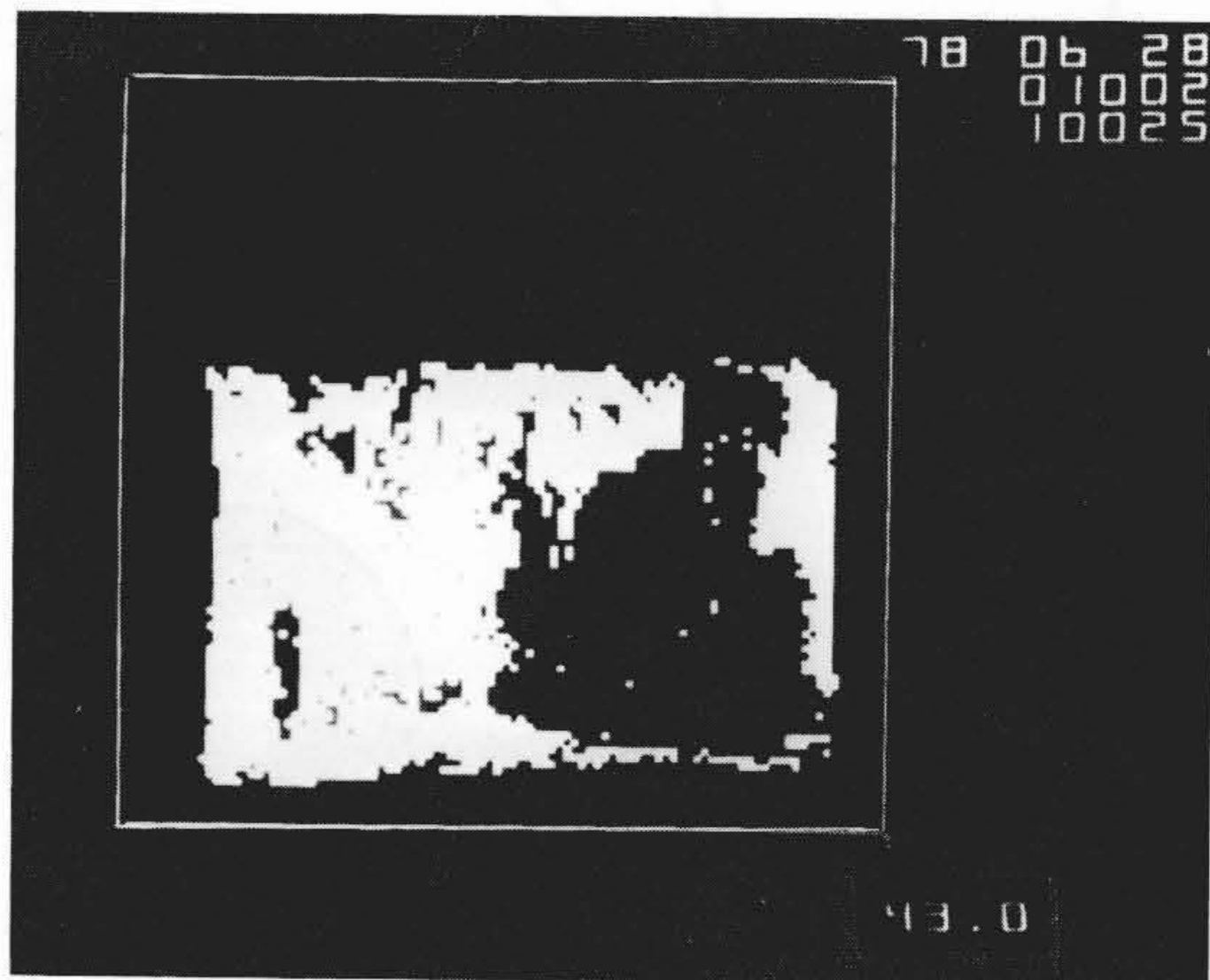
(b) 図10の点Bの顕微鏡写真

図11 ろう付層の顕微鏡による観察結果 (a)はX線、超音波いずれの場合も検出できた。(b)はX線では検出できなかったが、超音波では検出できた。





(a) 走査領域表示



(b) 欠陥像の表示

図12 手動探傷結果の一例 (a)の走査領域表示をモニタしながら探触子を走査し、終了後(b)の欠陥像表示に切り換えると、欠陥像及び欠陥率(43.0%)が表示される。

## 5 結 言

タービン発電機や核融合装置などのコイルのろう付接続部検査法として用いる超音波探傷法を自動化し、検査作業の標準化、合理化を図ることを目的として、接合不良部を映像化し、かつ欠陥面積率も同時に測定、表示する欠陥面積率測定機能付超音波探傷装置を開発した。ろう付試験による性能試験の結果、以下の結論を得た。

(1) 検査を自動化し欠陥面積率も同時に表示することにより、

従来の手動による超音波探傷試験に比較し、検査効率を大幅に向上できた。

(2) X線像としては検出できなかった大きさ $0.02\sim0.04\text{mm}$ のボイドからなる接合不良部を連続した超音波像として映像化でき、超音波による高感度な探傷が可能であることが分かった。

以上の結果、この装置を実機のろう付部探傷に適用できることが確認され、検査員の個人差によらない、信頼性の高い検査が可能となった。

## 論文抄録

# 実用期に入ったデジタル画像処理 産業応用 物体認識

日立製作所 依田晴夫

電気学会誌 98-11, 1057 (昭53-11)

三次元物体の認識は、人工知能の研究として1960年代の初めごろから広く行なわれ、特定の制限下での限られた種類の物体の認識ならばなんとか可能になりつつある。一方、1970年ごろからこのような物体認識の技術は、工場での製品組立工程、目視検査工程、物流システムなどの省力化のための基礎技術として注目を集め、積極的に工業応用への試みが行なわれるようになった。この論文は、これらの試みのうち特に物体の形状、位置の認識手法について解説したものである。

物体認識を行なうには、映像処理以前に照明や背景のような環境を整備することが重要である。陰影は物体認識を難しくする要因であるが、表面の傷、刻印、粗さなど凹凸を認識したい場合には、逆に陰影を利用して明確な映像データを作ることができる。また、認識対象が数種の場合には、対象物体の差を強調する照明を工夫することができる。複雑な背景も認識処理を難しく

する主要因であり、事情の許す限り簡易化することが望ましい。

物体認識の最も一般的な方法は、物体の輪郭像を線図形化して直線や円弧の組合せで近似し、それらの結合状態や包含関係を調べることによって行なう方法である。線図形化の方法としては追跡法が一般的であるが、境界線の形が単純な場合には輪郭映像をパラメータ空間に変換して、その方程式を求めるパラメータ法がある。また、同一の濃度値をもつ画素の固まりから領域を作り、特定の基準によって隣接領域を順次統合し、物体固有の面情報を得ようとする領域法がある。以上のような一般的手法のほか、実用面を意識した簡易な方式も提案されている。これらの多くは物体を2次元のシルエット像として扱う方法であり、対象物体映像を極座標映像に変換して登録パターンと回転しながら比較したり、輪郭線の波形のフーリエ係数を比較したり、一次元投影波形を用いたりする方法などがある。

工業応用に関しては、認識対象物体の種類が限定されており、背景や照明条件も認識装置向きに設定できる場合が多いので、補助手段によってどこまで環境整備を行ない、どれだけの機能を視覚装置にもたせたら最適になるかが最も重要である。ボルト締緩ロボットではボルト映像が1次元的に視野中を移動するようにし、テレビジョン画面中の固定窓内での一致度を時々刻々計算するようにしている。全自動トランジスタ組立システムでは、映像中の特徴的部分映像を部分パターンマッチング法によって検出し、ペレットの位置回転角を認識している。これらは、専用認識装置化により $\frac{1}{10}$ 秒という高速認識を達成している。汎用計算機を用いて処理を行なうには、多種の処理を組み合わせた階層的手段によって高速化を図ることが必要であり、自動車用ICの位置認識、プリント基板せん孔機の例では、ヒストグラム処理、部分パターンマッチング処理、追跡処理などを組み合わせている。