

# 超音波探査映像システムの開発

## Development of Scanning Acoustic Imaging Systems

野中寿夫\* *Toshio Nonaka*

近年、半導体、新素材などが広く製品の重要部分に使われることが多くなってきた。この結果、これら部品の信頼性評価が重要になり、従来、検出が困難であった部品内部の数十ミクロン以下の微小欠陥まで検出する必要性が生じてきた。本論文では、これらの欠陥を超音波によって検出する探査システムの開発について述べる。このシステムは、コンピュータを搭載し、超音波による測定機能にデータ処理、画像処理を加え、欠陥の検出を高精度に行なうことを目的としたものである。その結果、セラミックスや半導体内部のはく離、ボイドの欠陥検出を可能にすることができた。この技術成果は、電子部品やセラミックスの微小欠陥検出を対象とした超音波探査映像装置AT5000として製品化されている。

### 1 緒言

超音波による非破壊検査技術は、画像処理技術、データ処理技術とあいまって、医療分野で著しい発展を遂げ、診断、治療に威力を発揮している<sup>1)</sup>。また一般産業分野では、超音波探傷として広く用いられてきた。これらは1~10MHz程度の低周波の超音波を使用しており、分解能は比較的低い<sup>2)</sup>。最近超音波顕微鏡が出現し、表面直下の微細欠陥の検出、材料特性の評価などに用いられ始めた<sup>3)</sup>。超音波顕微鏡で使われている周波数は、100メガヘルツから数ギガヘルツにわたるものであり精度は良いが、超音波減衰が大きく、物質内部深くの欠陥情報をとらえるには不十分な場合が多い。一方材料分野では、セラミックス、複合材などの構造部材、半導体など電子部品、センサなどの機能部材の発展が目覚ましく、新しい用途が次から次へと開発されており、建設機械のように屋外で過酷な環境にさらされる機械にも電子制御が導入されるようになってきた。特に半導体に欠陥が存在すると、断線や回路破壊の原因となり機械の制御が不能になるため、その信頼性がいっそう重要になってきている。これらの部品に共通している点は、いずれも微小欠陥の存在により破損又は破壊する危険性があり、わずか一つの微細な欠陥の存在が、巨大な事故の原因になることもある。そのために、この分野での適切な信頼性試験法の確立が社会的急務であり、微小欠陥が検出できる非破壊検査手法の確立が望まれてきた。本論文ではこのような点を考慮しながら、材料内部の微小欠陥探査を目的とした超音波による評価システム技術の開発について述べる。

### 2 仕様の決定

本システム開発の目的は半導体、セラミックス、複合材などの微小欠陥の検出手法を検討し、これをユーザー側にたった商品としてまとめるための技術確立にある。超音波信号による欠陥検出は、使用する装置の周波数帯域や探触子の種類により性能上の制約を受ける。そこでまず適用対象を、

- (1) 新素材分野(セラミックスなどの微小欠陥の検出)
  - (2) 電子部品分野(主として接合界面のはく離欠陥の検出)
- に限定し、現状での要求仕様を調査した。その結果と従来の鋼構造物系の欠陥探傷を考慮して、次のような目標を設定した。

- (a) 検出可能な最小欠陥は、セラミックスの強度評価を考慮して、50 $\mu$ m以下とする。
- (b) 半導体、複合材のはく離の検出が可能である。
- (c) 物体内部の欠陥が検出でき、鋼構造物系の超音波探査も行なえる。
- (d) 用途を研究開発、抜き取り検査などと考慮して測定時間を決める。
- (e) 製品化した場合、顧客の最も使いやすいシステムとし、探触子の選定から結果の評価まで、顧客の業務を助ける強力なツールとする。
- (f) データ処理、画像処理及びその他の信頼性検査手法との複合を容易に行なうため、コンピュータ搭載システムとする。
- (g) 一般論として、ユーザーニーズの多様化と高度化のため、製品は開発終了時点から陳腐化が始まり、しだいに初期の仕様だけでは対応できなくなる。これに迅速に対処し常に強力な機能を維持していくために、ハード、ソフト共にモジュール構成をとる。

以上の諸項目を考慮し、従来から研究に利用してきたデータ処理システム技術<sup>5),6)</sup>をもとにして、表1に示した具体的仕様を決定した。

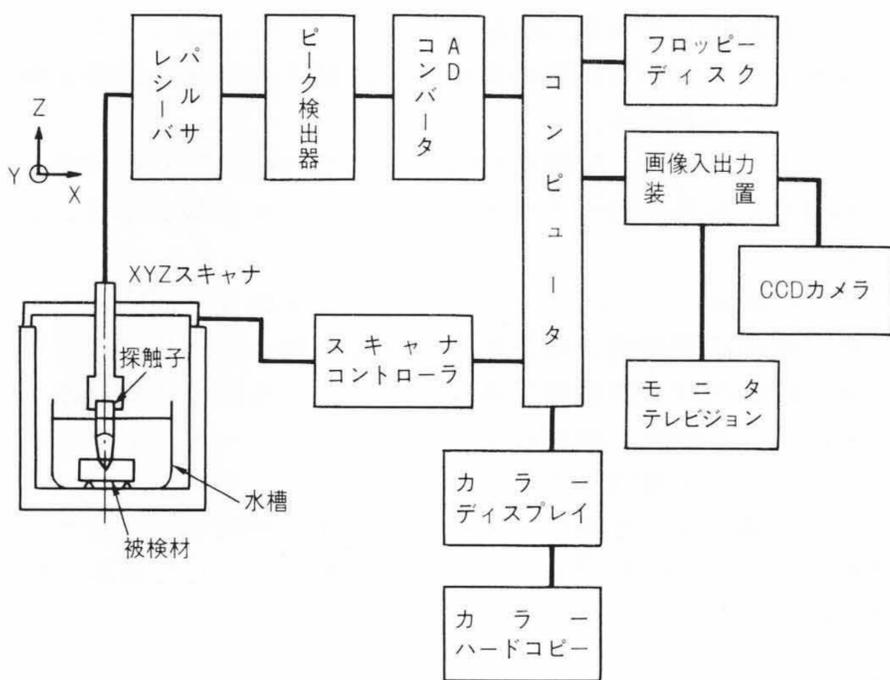
### 3 ハードウェア構成

上記仕様を達成するために、50MHzまで使えるハードウェア構成を採用した。図1に実験装置のブロックダイアグラムを、表2に主要ハードウェアの仕様を示す。次に、各装置の機能について簡単に説明する。パルサにより発生された高電圧パルスが超音波探触子に付加され、内部の圧電素子が励起され高周波振動が発生する。この振動が超音波として探触子から放射される。高周波超音波は減衰及び反射特性により気体から固体へ直接入射させることは難しいので、純水を介して伝搬させることにした。固体試片に入射した超音波は、弾性波として内部に進行しクラックや材質の異なる物質の境界層など、音響インピーダンス(密度×音速)の急変する部分で反射、屈折する。反射した弾性波は逆の径路をたどって、再び探触子に到達し、圧電素子によって微弱な電圧信号に変

\* 日立建機株式会社技術研究所

表1 超音波探査映像システムの主要仕様 微小欠陥の検出を行なうため、各種のデータ処理機能、画像処理機能が付加されている。

項目	主要仕様
1. 超音波探傷器 探傷方法 周波数 欠陥検出寸法	パルス反射式 水浸法 ~50MHz 0.05mm以下(50MHz)
2. 画像処理機能 表示の種類 画像倍率 表示階調 画像処理	Cスコープ 任意変更(拡大は整数倍) モノクローム 256階調(256ドット×240ドット) カラー 8階調 拡大, 縮小, 画像切出し, 移動, 2値化, 膨脹, 収縮, フィルタ処理, 強調処理, 頻度分布, 欠陥面積率など
3. データ処理装置 メモリ容量 外部記憶装置 データ処理	パーソナルコンピュータ 1Mバイト ミニフロッピーディスク(640kバイト×2) はく離部抽出, エコーレベルシミュレーション, 探触子特性算出, 欠陥サイズの計測
4. 記録装置	カラーハードコピー モノクローム写真(ポラロイド, 35mmカメラ)
5. 走査装置 走査範囲(X, Y, Z) 走査ステップ 速度	150×150×100mm <sup>3</sup> 10μmから任意設定 最大200mm/s



注：略語説明 CCD(Charge Coupled Device)

図1 実験装置の構成 高周波超音波を物体内に伝搬させるため水浸法を採用し、10μm精度の3軸スキャナにより位置制御を行なっている。

表2 主要ハードウェアの仕様 50μm程度の微小欠陥を検出するため、レーザは50MHz帯域のものを使用している。

項目	仕様
超音波探触子	25MHz焦点形(標準)
パルサ	パルス幅: 0~360V
レーザ	ゲイン60dB, バンド幅: 0.5~50MHz
ピークディテクタ	RF波, 検波切換え
A-Dコンバータ	12ビット
コンピュータ	16ビット, フロッピーディスク640kバイト
ディスプレイ	カラー8色
画像入出力装置	画像表示ドット256×240×8ビット ビデオ信号入力端子付き
走査装置	X, Y, Z軸制御
テレビジョン入力装置	CCDカメラ

換され、レーザによって増幅される。これをオシロスコープで観察すれば、超音波伝達経路での物質の音響的特性を推定することができる。信号には幾つかの内部情報が含まれている。まず反射エコーから欠陥の存在が分かる。次に超音波の伝搬時間と素材の寸法から欠陥の位置、材料の音速が検出できる。これより材料の弾性的特性を推定することができる。更に、減衰特性からも材料の性質を知ることができる。しかし、オシロスコープだけの観察では、材料中深さ方向1ラインに沿った情報しか調べられない。これでは試験片全体を検査するには著しい時間が必要となり、実用的ではない。そこで探触子を上下(Z)、水平(XY)面内を自由に移動できる走査装置に取り付け、各設定位置からの信号をコンピュータにより効率よく検出できるようにした。各方向への移動ピッチはコンピュータにより任意設定できるが、最小10μmである。超音波信号の時間軸は、物質内部の位置を示すから、均一材質から成る試験片では、パルス又は表面エコー発生時点を基準として所定時間後の超音波エコーをとらえれば、一定深さでの欠陥情報が得られる。しかし、レーザで増幅された高周波信号を直接AD変換し、コンピュータ処理することは難しい。一般に、欠陥の状態は超音波エコー信号の振幅の大きさにより評価される。そこでレーザで増幅された信号のうち、一定時間範囲内のピーク値をピークディテクタで検出しこれをAD変換して、コンピュータメモリに記憶させることにした。走査装置と連動してこの作業を行なえば、一断面内の超音波信号の大きさの変化を記憶することができる。メモリデータは、画像入出力装置により、信号レベルを輝度レベルに置き換えてモニターテレビジョンに出力される。本装置では256階調の輝度レベルを採用した。これは階調が少ないと微小な欠陥からの小信号を見落としてしまうからである。なお解析結果は、8階調でカラーディスプレイに表示することができる。コンピュータにより画像データから欠陥サイズの検出、エコーレベル頻度分布、2値化、画像の強調などの処理が行なわれる。これらの画像はカメラ又はカラーハードコピーで記録することができる。また、フロッピーディスク装置により記録し保存できるため、いつでも画像の再生処理が行なえる。なお、本システムにはビデオ信号入力端子が設けてあり、画像処理機能を利用して他の検査法と複合した処理が行なえるのも一つの特徴である。

#### 4 ソフトウェア構成

実験を効率よく行ない欠陥を正確に検出するには、各ハードウェアの機能を十分に引き出すソフトウェアが必要であり、システムがフレキシブルであればあるほどソフトウェアの重要性が増してくる。信頼性データは多方面からの現象解析が必要であり、既成のソフトウェアだけでは評価が不十分になることが多い。また一度完成したソフトウェアは、一見劣化しないように思われるが、周辺技術の発展によりしだいに陳腐化してしまい、拡張がしばしば必要になる。この点を考慮してプログラム構造は基本的には小モジュールの組合せとし、各モジュールを任意に変更、追加できるようにした。非破壊検査を含む信頼性検査の目的は、あくまで製品の品質を信頼性の面から保証するのであるから、最終的には各ユーザー自身が開発した手法にのっとり評価しなければならない。このユーザー作成部分のソフトウェアとの結合がうまくできないと、信頼性評価システムとしては十分力を発揮することは難しくなる。そこで本システムでは、ユーザー作成プログラムとの結合は幾つかのデータファイルを介して行なう形態と

した。本システムのソフトウェアを大別すると、

- (1) 走査装置の制御と探査データの入力
- (2) データ処理, 画像処理
- (3) サポートプログラム

に分けられる。開発したソフトウェア一覧を表3に示す。実行形式はメニュー選択方式とし、ディスプレイ表示された項目を自由に選択すれば、初心者でも簡単に測定を行なうことができる。以下、各ソフトウェアの機能について述べる。

**4.1 走査装置の制御とデータサンプリング**

走査装置の横方向移動と同時に、一定間隔ごとに発生するパルス信号を利用して、超音波エコーデータのピーク値がサンプリングされる。所定距離走査後、縦方向に1ピッチ分移動し、再び横方向に走査する。走査時間の短縮を図るため戻り過程でもデータサンプリングが行なわれ、同時にモニタテレビジョン上に音響像が表示される。モニタテレビジョン上に超音波映像が得られても走査装置の役割は終わったわけではない。時には映像上で発見された欠陥の位置に探触子を移動させ、その超音波信号を調べ欠陥の特徴を解析する必要がある。例えば、はく離の確認、欠陥サイズの計測、焦点ぼけの調整等々、また欠陥部分の詳細をより小さいピッチで走査して調べる必要もある。本システムでは、測定中常に探触子の位置を記憶しているため、映像上に重ね合わせたカーソルに連動して走査制御することにより、容易にこのような解析を行なうことができる。

**4.2 データ処理, 画像処理**

本システムの特徴の一つは、データ処理機能, 画像処理機能を充実させたことである。超音波探査により得られるのは音響像であり実態の像ではないから、このままでは欠陥の性状を正確に評価できないためである。従来のAスコープによる欠陥

評価では、形状の複雑さ、材料の性質の違い、使用する探触子の特性などにより評価が大幅に異なることがあるのもこれに起因する。そこで種々の評価機能を加え、超音波探査の信頼度を上げ、ユーザーが評価するのに必要な情報を容易に提供できるようにした。画面上の特定領域内の信号強度分布特性は、接着、はく離の状況や欠陥の性質を示している。また、適切な強調処理を行なうことにより欠陥像を明確に表示することができる。これと前述の走査機能を合わせることで、被検体内に存在する微小な欠陥を明らかにすることができる。

**4.3 サポートプログラム**

超音波探査では、探触子の特性や欠陥エコー信号の反射特性を知る必要がある。本プログラムでは境界面からの反射率、透過率、焦点形探触子の焦点径、平たん形探触子の近距離音場限界距離など、測定に必要な数値の算出ができる。また画像上に種々のカーソルを描画させることにより、部分的な強調処理ができる。画像データをファイル化することは、繰返し処理や後の報告書作成に有効であるが、記憶容量は有限であるから、モニタテレビジョンに表示されている画像のうち必要部分だけを切り出して記録できるようにした。

**5 解析結果と考察**

超音波による欠陥検出では、探触子の特性を把握しておくことが最も重要である。平たん形探触子を使用したとき、近距離音場では超音波信号の音圧レベルは干渉のため複雑に変化することが知られている<sup>2)</sup>。この複雑な音場特性を調べるために直径5mmの鋼球を水中に置き、平たん形探触子を使って走査した結果を図2に示す。音響像に引かれたカーソル線に沿って超音波エコー分布を見ると、近距離音場限界距離 $N$ では、中央にピークをもつ同心円状の音圧分布を示すが、探触子を鋼球に近づけた $0.33N$ ,  $0.2N$ の位置では、クレータ状の音圧分布を呈し、しかも中央の音圧が著しく変化していることが分かる。この限界距離 $N$ は焦点形探触子を用いることによって短くすることができる。これが焦点距離に相当する。(d)は焦点形探触子による音響像であり、より正確に目標をとらえている。以下、この焦点距離での超音波信号をとらえ、映像化した例について述べる。

図3にジルコニアと銅の接着界面の超音波探査像を示す<sup>7),8)</sup>。一般的に映像の明るい部分ははく離部、暗い部分は接着している部分と解釈できる。更に詳細を調べるため、同図中のボックスカーソルで囲んだ部分a, b, c内のエコー頻度分布を図4に示す。a部ははく離部で超音波エコーはジルコニア底面と水の境界で反射したものである。底面が平たんであるため、エコーのばらつきは少なく、変動係数は0.38%と著しく小さい。接着界面bでの反射エコーレベルは低く、変動係数も1.1%に増加している。また同じ接着面cでは、更にエコーレベルが低下するとともに変動係数も3.5%に増加している。分布波形から2ないし3の異なった状態が混在しているように見える。これはエコーの分布特性が接着程度と関係をもっていることを示唆している。

図5はマコール試験片に開けたドリル穴を上面側から探査した例である。素材の厚さは2mmで底面側に深さ及び径を変えた穴が開けてある。(a)は測定のままの音響像、(b)はe, f, g部を画像処理で強調したものである。強調処理により $40\mu\text{m}$ 径の欠陥の存在が明らかになっている。

高周波超音波により微小欠陥の検出が可能になるとともに、電子部品をはじめとして新分野への用途が拡大している。超音波探傷では、半導体チップ封止樹脂内部に含まれるボイド

表3 ソフトウェア一覧 ソフトウェアは、(1)走査装置の制御と探査データの入力、(2)データ処理, 画像処理、(3)サポートプログラムに大別されるが、各々小モジュール群で構成されている。

1.	走査装置の制御と探査データ入力 X, Yスキャナ制御(カーソル連動制御) Zスキャナ制御 データサンプリングと画像描画
2.	データ処理, 画像処理 フィルタ 平滑化, 垂直線, 水平線検出, ラプラシアン, メディアン, Sobelオペレータ 論理演算 論理和, 論理積, 反転, 排他的論理和, 加減算 画像変換 拡大, 縮小, 移動, 回転, 画像スワップ 階調処理 階調変換, 階調引伸し, 自乗, 自乗根, 対数変換, 等価ヒストグラム処理, 擬似カラー描画 2値化画像処理 膨脹, 収縮処理, 面積, 周囲長, 投影長, 円らしさの算出 データ処理 平均値, 標準偏差値算出, ラインエコー分布, エコー頻度分布 テレビジョンカメラ入力 カメラ, メモリ切換え, テレビジョン画像入力, アベレーシング, ラインピーク値トレーシング
3.	サポートプログラム 探触子焦点径, 超音波伝搬時間算出, 音響インピーダンス, 反射率, 透過率, 近距離音場限界距離算出, 弾性係数算出, 画像カーソル制御, ディスクファイルのセーブ, ロード, 統計処理ルーチン

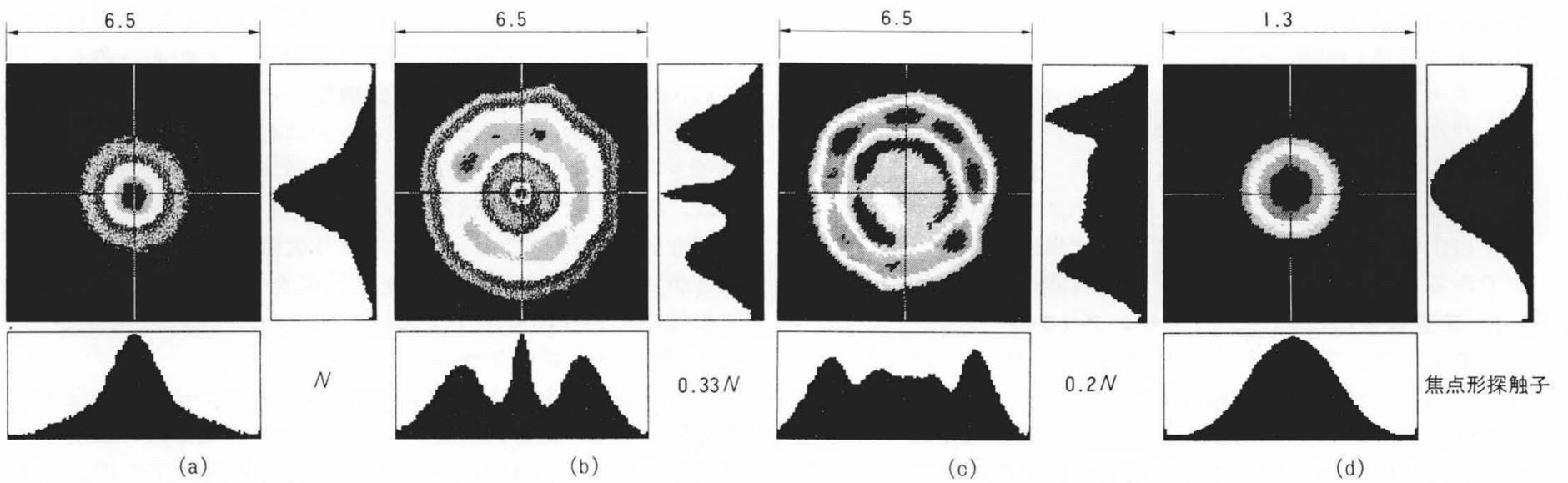


図2 近距離音場における鋼球の音響像 近距離音場限界距離 $N$ 以内の音場は、超音波の干渉性のため複雑に変化する。図は水中に置かれた直径5mmの鋼球を測ったものであるが、 $N$ 以下の距離では球が全く別の形状に見える。

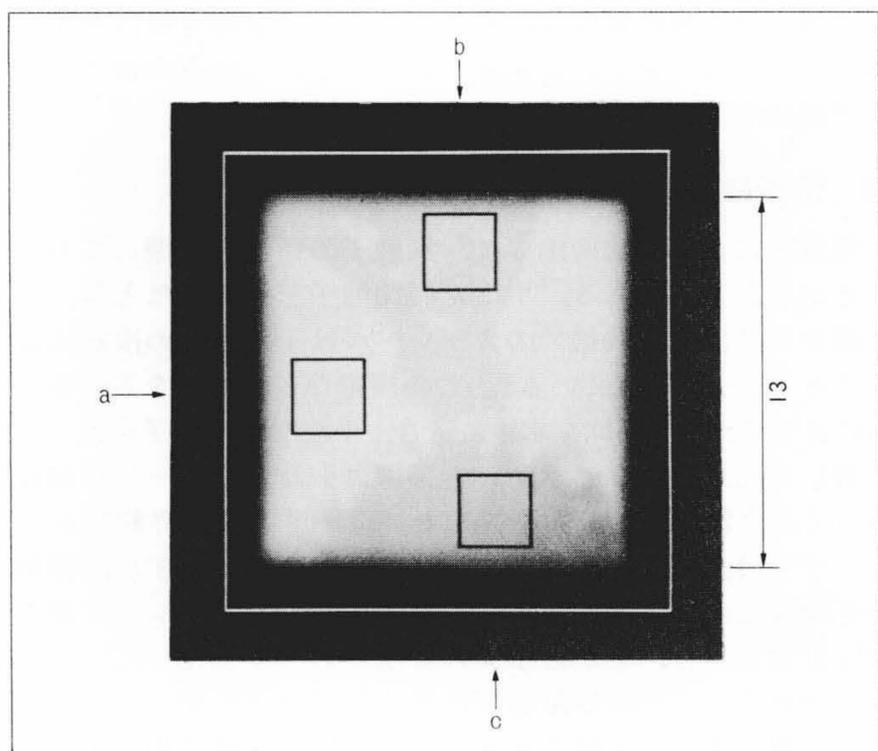


図3 ジルコニア-銅接着界面の音響像 aははく離部, b, cが接着部を示している。

や、シリコンチップと樹脂間のはく離などが検出できるため、信頼性評価の新しい手段として注目されてきた。ここで超音波による接着はく離の検出について検討してみる。超音波は音響インピーダンスの異なる境界で反射するが、その反射信号の大きさは界面を構成する物質のインピーダンスに左右される。しかも、インピーダンスの大きい物質から小さい物質に入射する場合と逆の場合では、入射波に対して反射波の位相が異なる。固体から水や空気のようにインピーダンスの低い物質に入射するときには、反射波の位相は逆転する。この事実は接着はく離の検出に重要な意味をもつ。通常の超音波探傷では取扱いの便から、探触子により検出されレシーバにより増幅された信号(以下、RF波と呼ぶ。)を検波した信号で欠陥の検出が行なわれる。これは主として、固体内に存在するクラックのように極端にインピーダンスの異なるものを対象としてきたためであり、位相の逆転した信号だけを取り扱えばよかったからである。これに対して種々の材料の接着はく離の評価を考えると、反射波の信号は入射波と逆相とは限らない。これを簡単なモデルで検討してみる。いま境界面に接着とはく離が混在している状態を考える。ある箇所からの超音波信号はその部分に含まれるはく離部からの反射信号と接

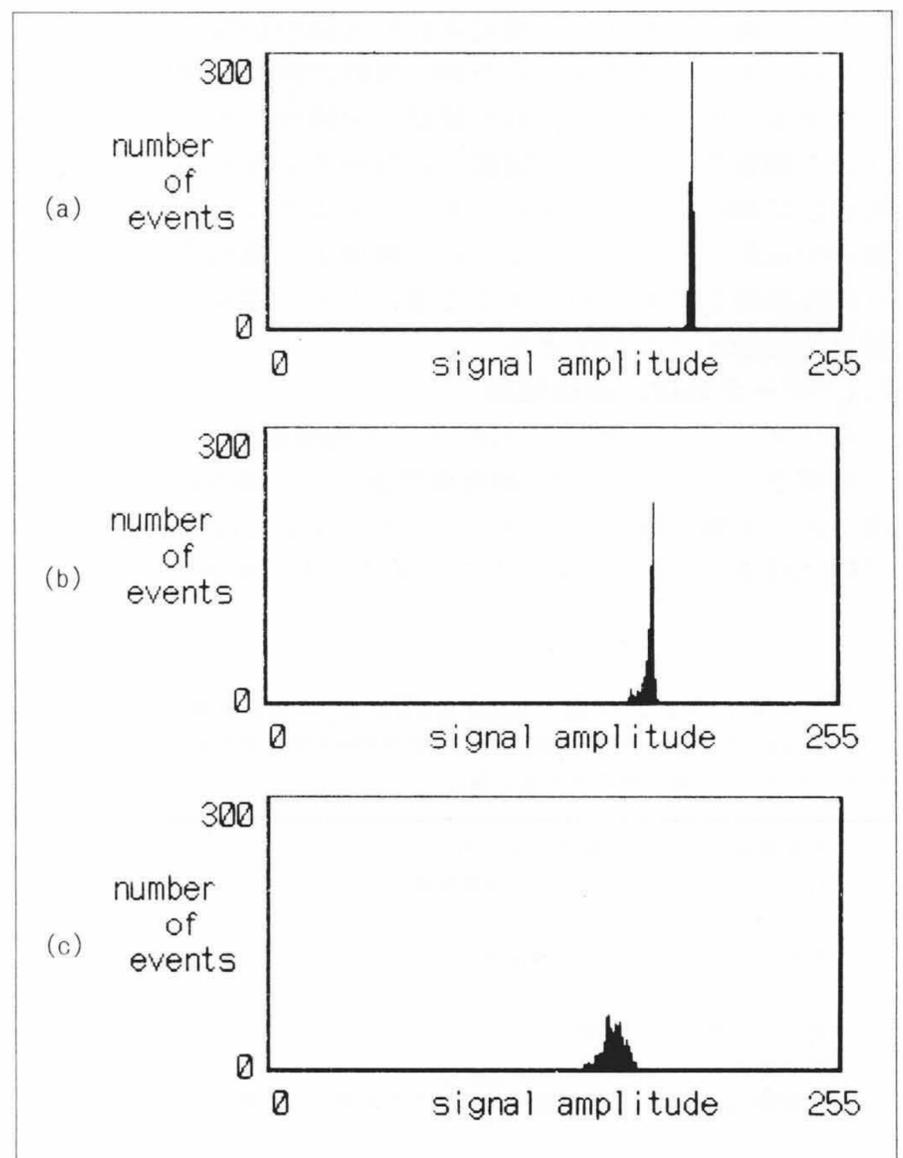


図4 超音波エコーレベル分布 図3のボックスカーソル部のエコーレベルの発生頻度分布を示す。接着の状況によって超音波の反射吸収特性が異なるため、頻度分布に差が現われる。

着部からの信号とが合成されるものとするれば、図6に示したようにはく離の進行とともに反射信号の大きさは変化する。同図はインピーダンスの小さい固体から大きい固体に超音波が入射する場合で、はく離部は空気層のモデルである。(a)は接着部からの反射波で、位相は入射波と同相である。接着度が小さくなると、この信号は減少する。(b)ははく離部からの反射波であり、位相は逆相である。はく離の進行とともに信号は増加する。(c)は(a)と(b)の合成信号である。実際にはこの信号がRF波として検出される。いま(+ )のピーク値に注

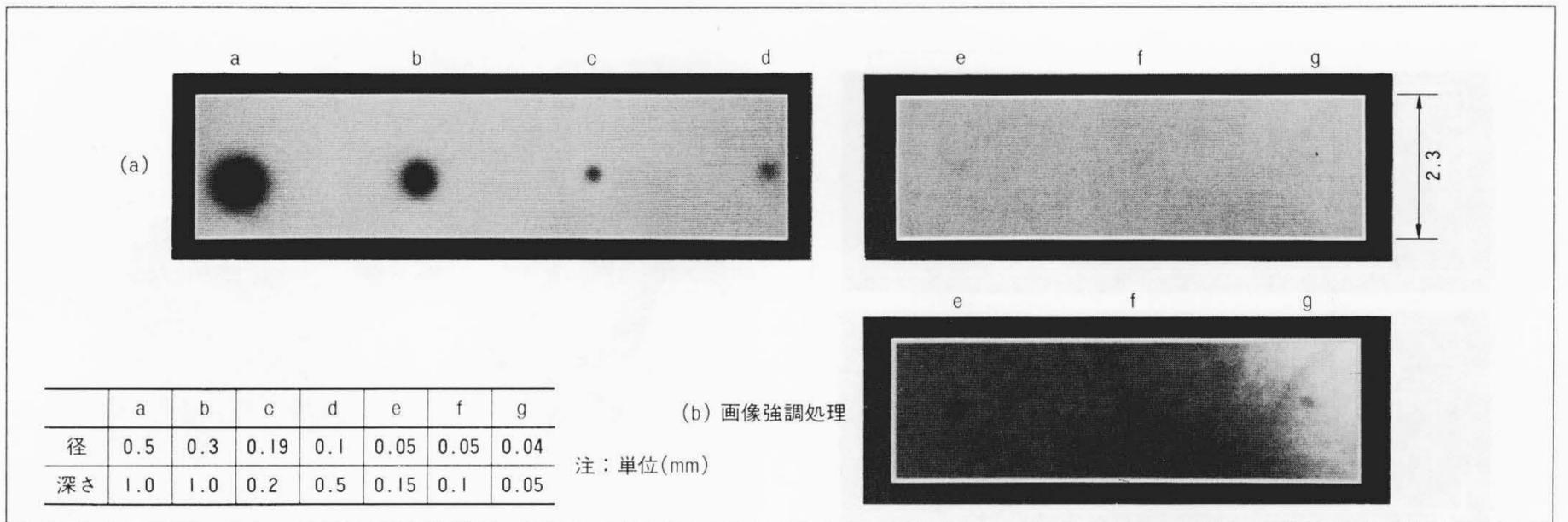


図5 ドリル穴の超音波映像 焦点は底面に合わせてある。ドリル穴の径及び深さを付表に示す。

目してみると、接着度合が低くなるとこのレベルは低下する。また(-)のピーク値ははく離の進行とともに増加している。(d)は検波の場合である。接着度合が高い場合でも低い場合でも、信号レベルは高くなっている。すなわち、検波信号の大きさだけで接着はく離の程度を判断すると、良好な接着を誤ってはく離と評価してしまうおそれがあることを意味している。図6の結果をまとめて図7に示す。(a)は(+)又は(-)ピーク値のレベルとはく離割合の関係、(b)は検波による表示である。明らかに前者のほうが優れているが、接着はく離の状況を詳細に観察するには必ずしも十分ではない。そこで(+)と(-)のピーク値のレベル差に着目して、接着とはく離の分離を図ることにした。図8は(-),(+)ピークによる半導体パッケージ内のリードフレーム及びシリコンチップと、樹脂界面の音響像と両データからレベル差を検出して、これからはく離情報だけを分離した結果を示す。図9はシリコンチップ上の(-)ピーク値による音響像である。(a)は購入品そのままであり、よく接着していると考えられる。(b)ははんだディップ

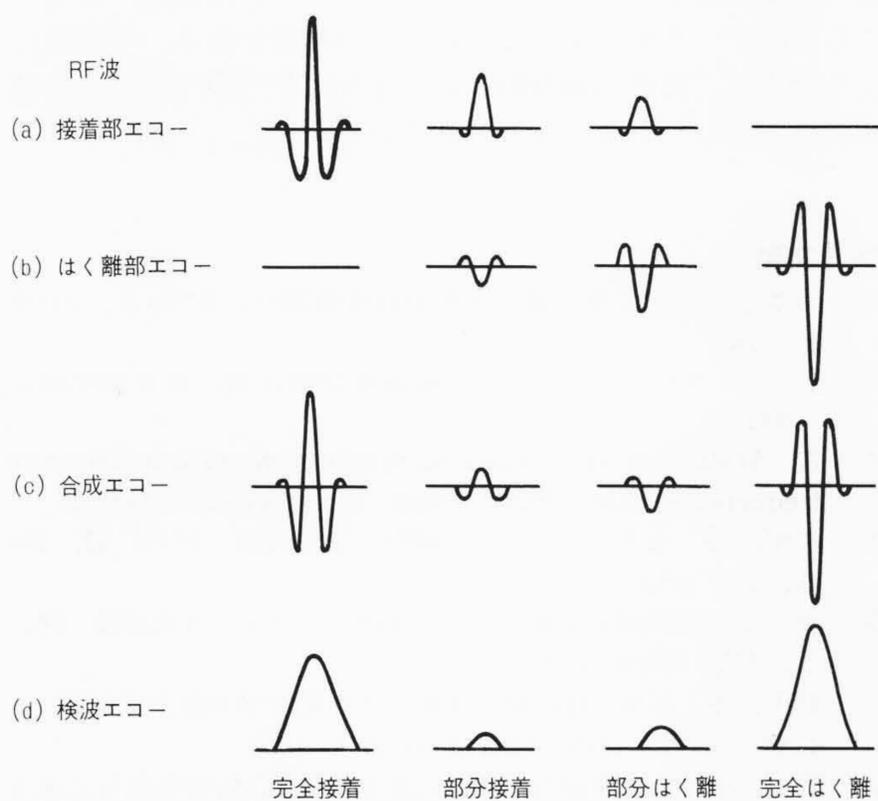


図6 接着・はく離における超音波エコーモデル (a)はRF波の接着部からの反射エコー、(b)はRF波のはく離部からの反射エコーであり、(c)は(a)、(b)の合成エコーを示す。また(d)は検波エコーであり、接着、はく離の情報が失われている。

により熱衝撃を加えはく離を発生させた後のものである。各カーソルで囲まれた部分の信号レベルをみると、①部に対してよりはく離が進行していると考えられる②部のレベルのほうが低下している。更にはく離の度合が強まるにしたがって、③、④とレベルが上がっている。この挙動は先の図7と一致している。

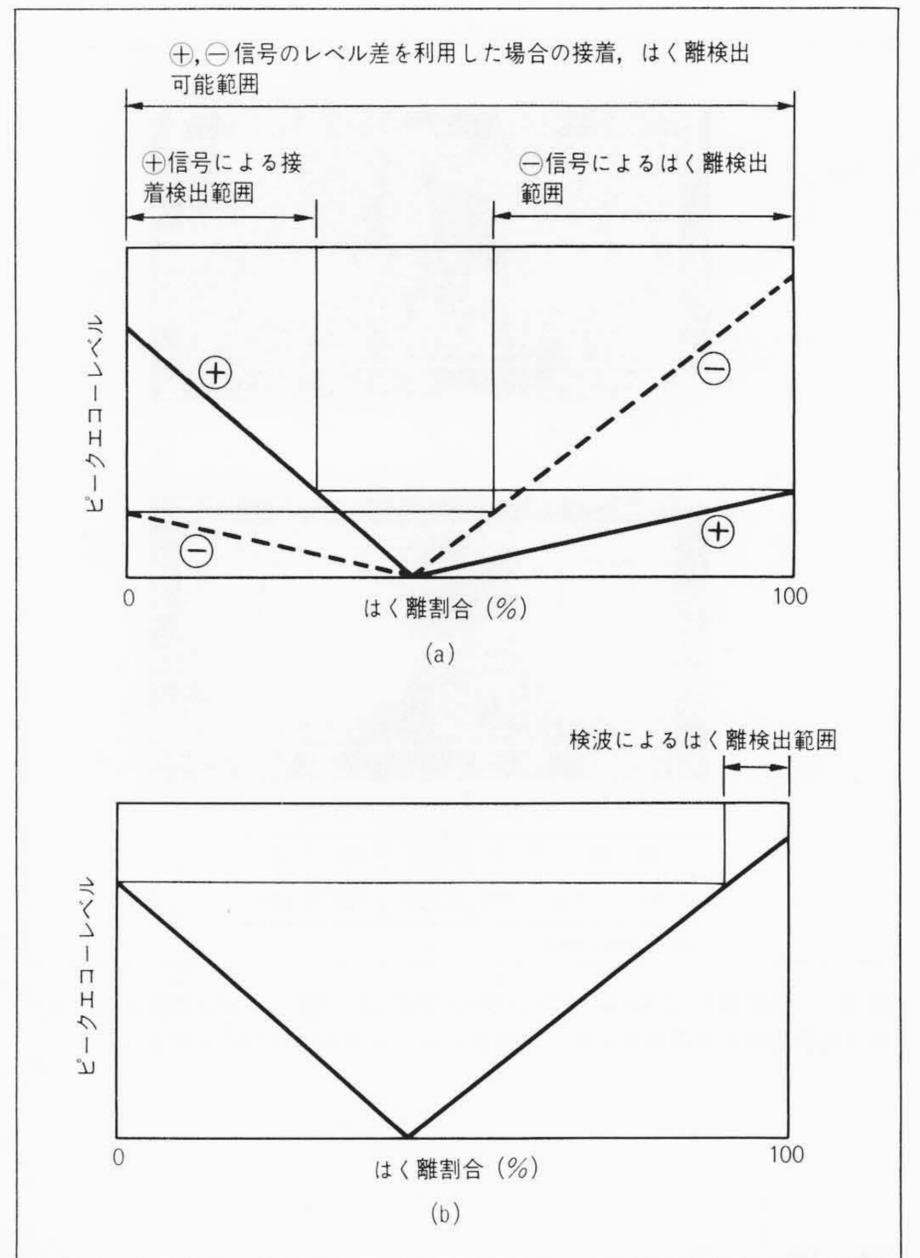


図7 接着、はく離の程度と超音波エコー (a)はRF波の+ピーク及び-ピーク値により表示したものであり、(b)は検波のピーク値により表示したものである。

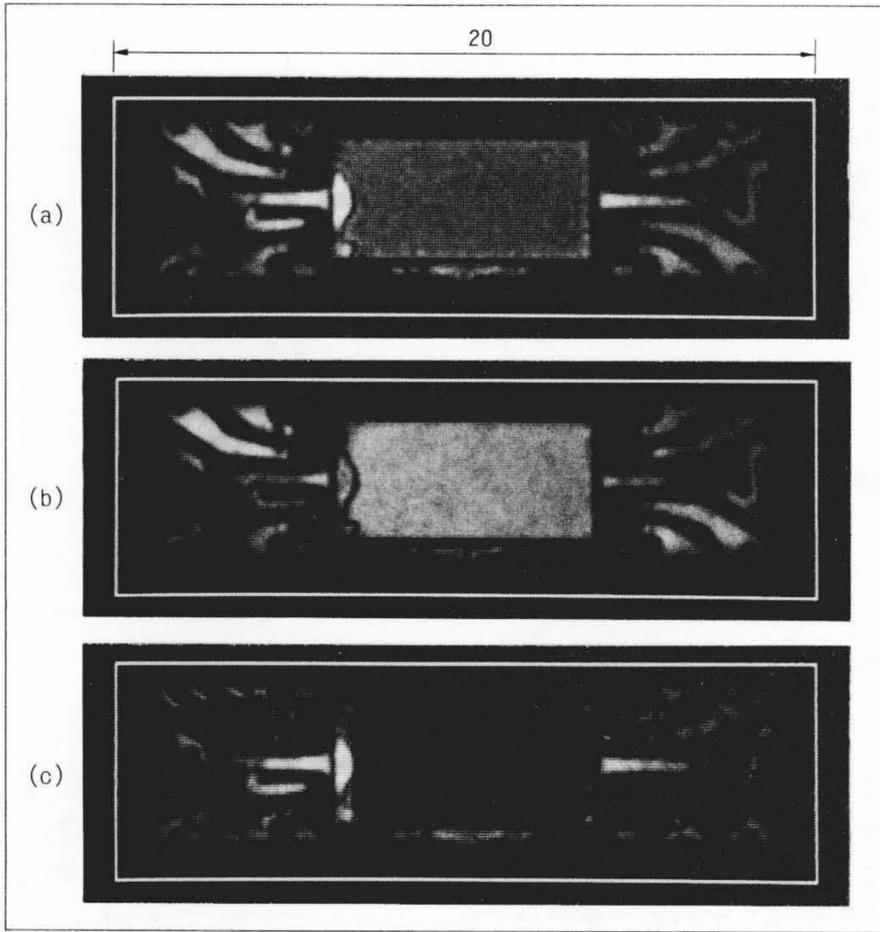


図8 半導体パッケージ内シリコンチップ，リードフレーム上のはく離検出 (a)はRF波のピーク値による音響像であり，(b)は+ピーク値による音響像である。(c)は画像処理によりはく離部を抽出したものである。白い部分がはく離を示す。

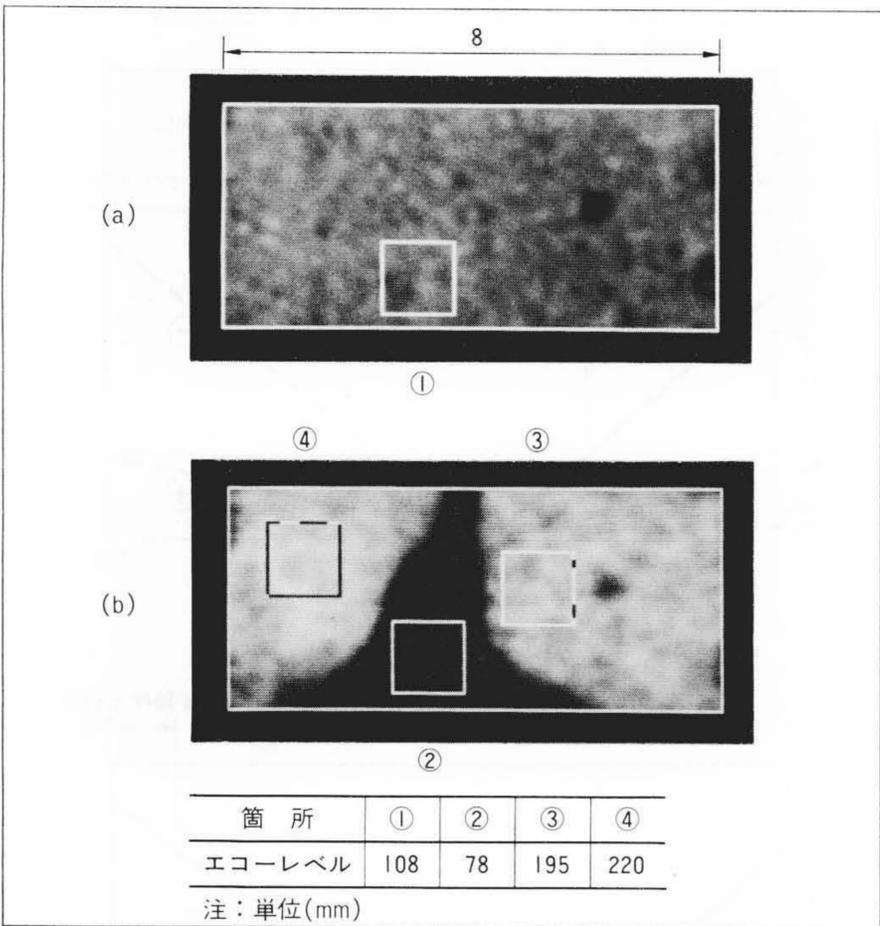


図9 熱衝撃によるシリコンチップのはく離 (a)は購入品のまま，(b)は熱衝撃後の音響像である。超音波エコーレベル(相対値)を付表に示す。

## 6 結 言

超音波探査技術にデータ処理，画像処理を加えたシステムによって，従来不十分であった半導体，新素材内部の欠陥評価も可能になった。しかし，固体内で超音波は複雑な特性を

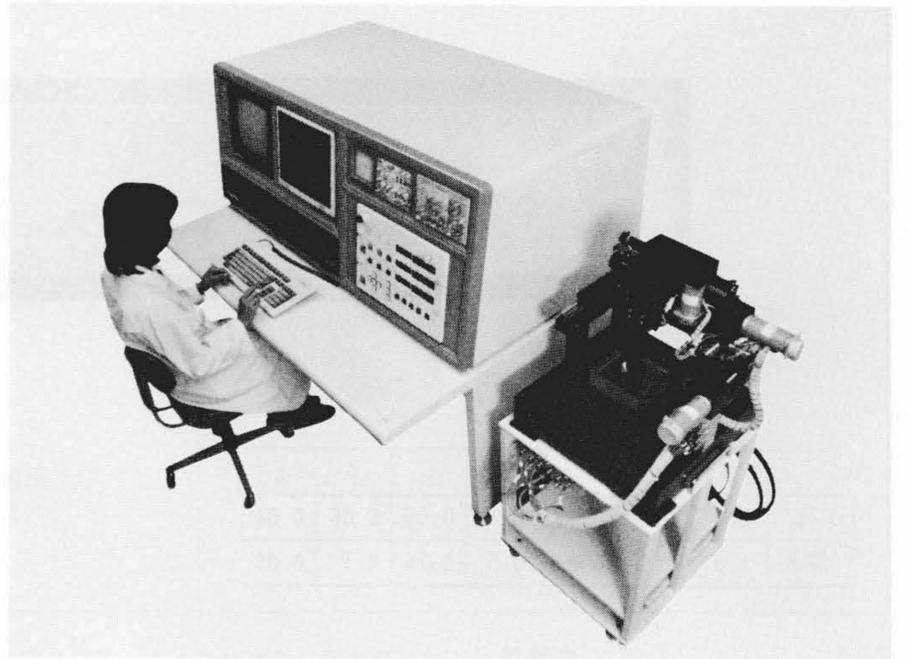


図10 超音波探査映像装置AT5000 セラミックス，半導体の接着・はく離の検出，微小欠陥の検出用に開発された装置で，50MHzまでの超音波探査が行なえる。

示すため，不用意に取り扱くと重大な欠陥を見逃すことがあり，事故の原因ともなりかねない。したがって，十分関係資料を検討し，その使用条件，限界を理解した上で探傷を行なうことが必要である。真の信頼性試験法を確立するには，単に一現象だけをとらえた評価法は危険であり，多面的見地から現象を解明していく必要がある。この装置にビデオ信号入力端子を設け，テレビジョンカメラ，X線装置などと組み合わせた複合機能がとれるようにしたのは，超音波だけでは評価できない場合でも他の装置から信号を得て，より信頼性の高い解析を進めることができるように考慮したからである。

最後に，本実験システムでの研究成果を盛り込み製品化した超音波探査映像装置AT5000の外観を図10に示す。ハードウェア的にはほとんど実験システムと同構成であるが，走査装置の制御に独立したマイクロコンピュータを使用し，走査中でも別のデータ処理を行なえるなどの特徴がある。本装置により新素材，電子部品分野への用途が広がりつつあり，非破壊検査の新しい発展が期待されている。

## 参考文献

- 1) 日本電子機械工業会編：医用超音波機器ハンドブック，コロナ社(1985)
- 2) J. クラウトクレマ，外：超音波試験技術，日本能率協会(1980)
- 3) A. Atalar, et al. : Acoustic microscopy with microwave frequencies, Ann. Rev. Mater. Sci., 255~281(1979-9)
- 4) 奥田，外：セラミックスの信頼性とその評価，材料，32，454号，119(1983)
- 5) 野中：建設機械の実働負荷計測解析システム，日立評論，64，9，695~700(昭57-9)
- 6) 野中，外：ボルト締結時の挙動，日本機械学会論文集(C編)，47巻，421号，1178~1186(1981-9)
- 7) 野中，外：接合界面の超音波による映像化，機械学会日立地方講演論文集，44~66(1985)
- 8) 野中：超音波探傷を用いた事例，ファインセラミックス部品の低コスト生産加工技術国際シンポジウムテキスト，精機学会，47~57(1985)