

材料及び機器診断のための超音波センシング技術の開発

Development of Ultrasonic Sensing Techniques for the Diagnosis of Materials and Machines

産業施設や機器の信頼性を向上させ、その安全を確保するための異常診断技術のうち、超音波を情報媒体とするものは極めて広範な適用分野があり、日立製作所も超音波の検出及び情報処理に関しては各種の技術開発を進めてきた。

超音波探傷法では、材料表層部探傷用探触子、散乱波を利用したき裂深さ測定技術、熱交換器伝熱管などの検査を可能にする管内挿入形探触子、超音波を電磁氣的に送受信する電磁超音波探傷装置などを開発し、AE計測法ではリンクチェーンの引張強度試験法、回転機などの可動部でのAE信号を検知する無線式AE検出器、滑り軸受の潤滑不良に起因する異常の検出法などを開発して、材料及び機器の診断技術の進展に寄与させている。

佐々木 莊二* Sôji Sasaki

佐藤 式也* Ichiya Satô

1 緒 言

近年、公共の安全確保と操業の安定化を図るために、産業施設及び機器の信頼性向上に対する要請はますます強くなっており、それに伴って、材料内の欠陥や機器の異常を検知するためのセンシング技術にかけられる期待はいつそう増大しつつある。

一方、破壊力学の進展は、材料の機械的強度に及ぼす欠陥の影響についての評価精度の向上をもたらしたが、そのためには欠陥の位置、形状、寸法などの正確な情報を取得することが重要になる。また、回転機械をはじめとする各種の機器や部材の異常を発見し、その原因を究明して対策を考える場合にも、異常の兆候をいち早く検知する技術の確立が先決になる。

ここでは、材料や機器の異常の診断を行なう場合に有用な超音波を情報媒体とするセンシング技術として、超音波探傷法とAE (Acoustic Emission) 計測法に着目し、それぞれ適用目的に応じて開発したセンサ部に関する幾つかの例について紹介する。

2 超音波探傷法におけるセンシング技術

超音波探傷法では、超音波パルスを被検体の探傷面から入射させ、検知しようとする材料欠陥などの音響的境界による反射波を受信するか、又は透過波の減衰を検知して材料内部の異常の有無を知る。これは、いわゆる「パルスエコー法」として主流をなしているが、被検体の形状や検出すべき欠陥の位置、方向性などの条件によっては、本法の適用性は著しく制約される。そのような制約を克服するため開発した探傷技術の数例について以下に述べる。

2.1 材料表層部の欠陥検出

機械、構造物などの材料の表面近くに存在する欠陥は、その部分の機械的強度を著しく低下させる原因となり、また仕上げ後の表面きずとなって製品価値を損ねる。

このように有害な材料表層部の欠陥探傷法としては、磁粉、浸透、うず電流、表面波などによる探傷法が用いられてきた

が、これらはいずれも表面からせいぜい2mm以内のごく浅い領域にだけ有効で、それ以上の深さでは探傷は困難になる。

上述の問題を解決するために、図1(a)に示すように、超音波探傷用の探触子を送波子と受波子とに分けて構成し、かつ斜めに設定する形式が考案され、表層部欠陥に対して優れた検出能力をもつことが実証されている¹⁾。この探触子の送波子側振動素子は湾曲凹面形にしてあるので、ここから送出された超音波ビームはいったん集束し、材料内に透入後は広い角度にわたって広がるようになるので、表面近くから比較的深部にまで感度領域が及ぶことになる。

図1(b)に、表層部欠陥探傷用探触子の概略構造を示す。この探触子では、探傷に有害な被検体表面による散乱エコーは送・受波子間を仕切るしゃ音板によって受波子に到達するのをしゃ断するので、被検体内部で生ずる欠陥エコーだけが受信される。したがって、表面が多少粗い場合でも、そのための障害が少ないことが特徴である。本形式の探触子（周波数2.25MHz）による探傷試験の結果では、被検体表面下0～20mmの範囲にわたりほぼ一様な感度で探傷でき、かつ欠陥の存在する深さをエコーの受信時間を測定することによって±1mmの精度で推定可能であり、多くの機器部材の欠陥検査に効果を収めている。

2.2 超音波散乱波を利用したき裂深さ測定

機器、構造物などで特に応力を受ける部分については、材料表面でのき裂の発生の有無、及びその大きさを監視することが重要になる。表面に開口するき裂の検出には、前節でも挙げている各種の表層部欠陥探傷法や電気抵抗法などが用いられてきたが、き裂の深さを信頼できる精度で測定することは難しかった。これに対し、材料内に透入させた超音波の組織による散乱波を利用してき裂深さを測定する信頼性の高い方法を開発した²⁾。

図2(a)に示すように、き裂をまたぐようにして送・受波子をセットする。送波子から送出された超音波パルスは、被検体の材料組織によって散乱波を生じ、これが受波子で受

* 日立製作所日立研究所

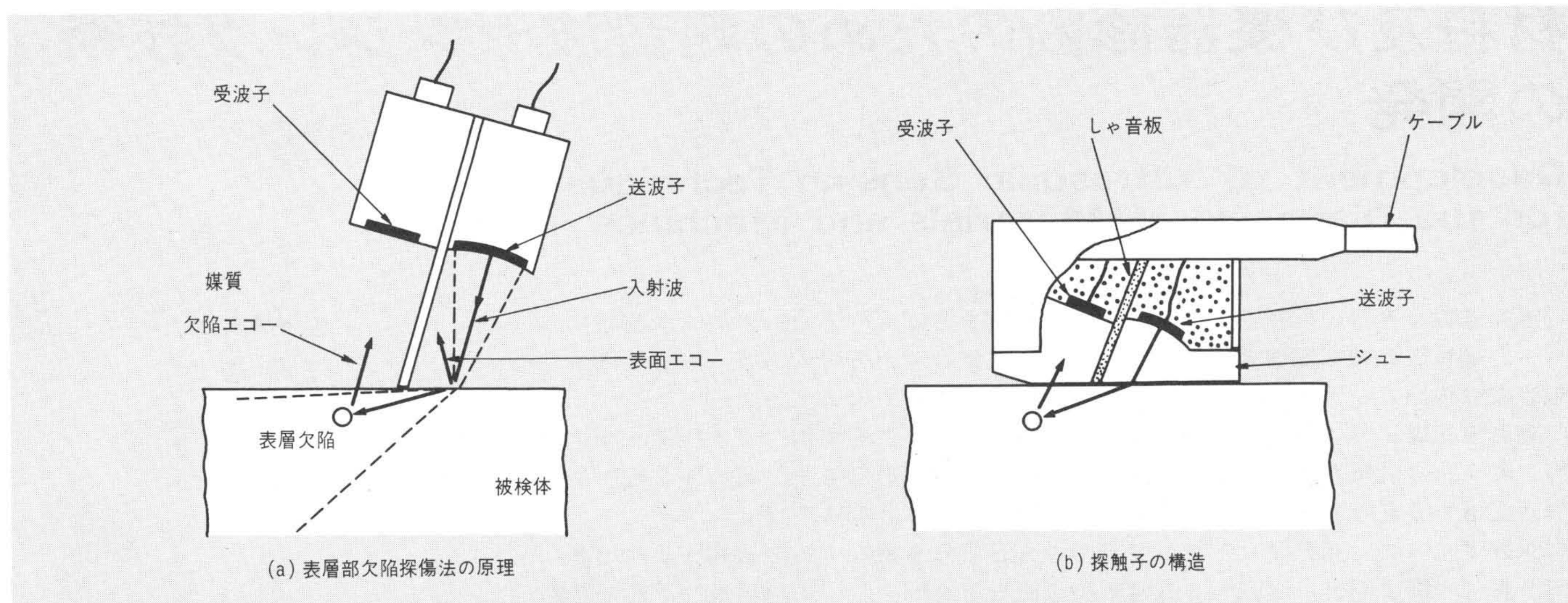


図1 表層部欠陥探傷法の原理及び探触子の構造 (a)の図で送・受波子と被検体間には超音波の伝達媒質がある。

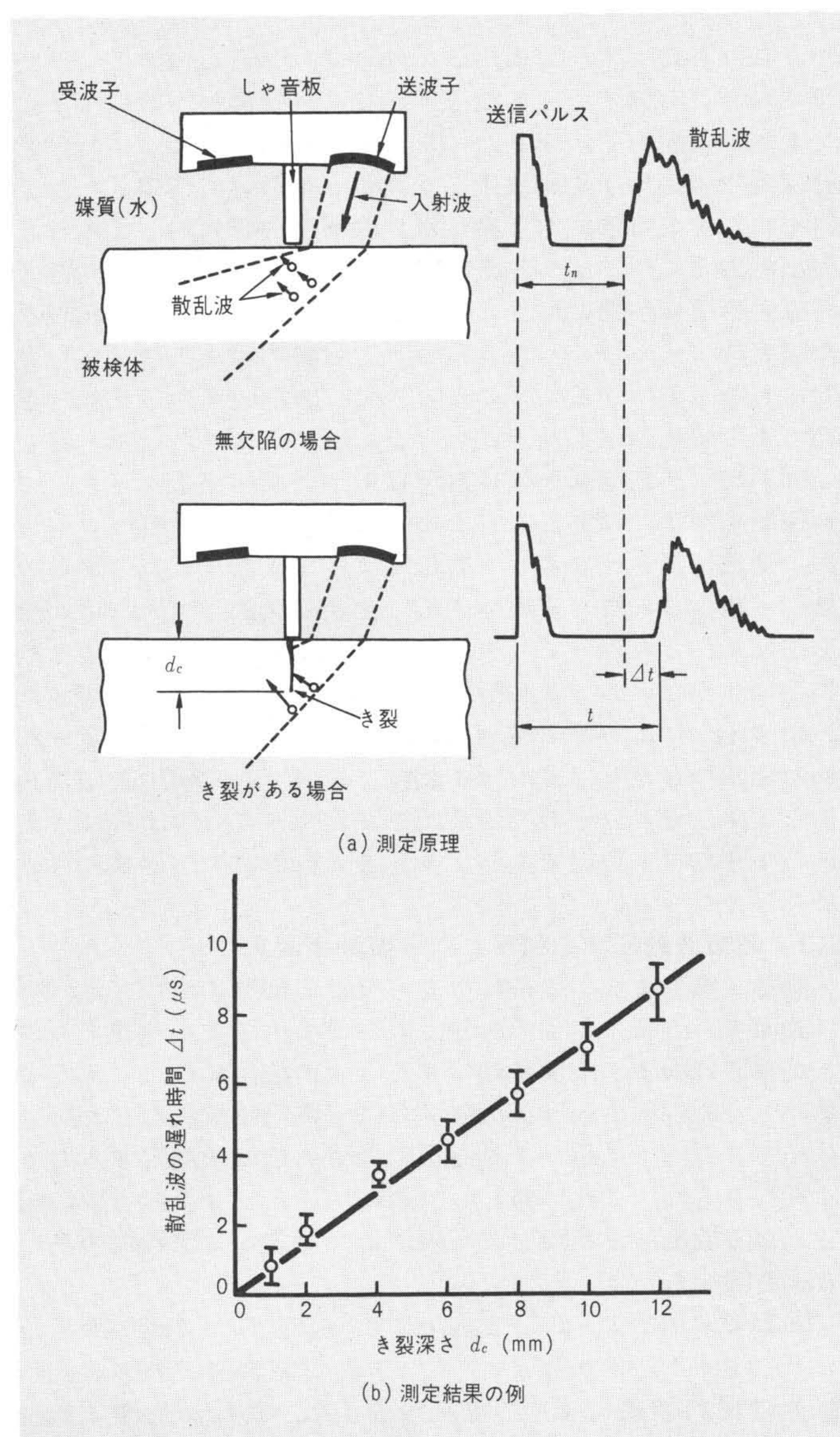


図2 超音波散乱波を利用したき裂深さの測定 図(b)の測定結果の例では、き裂深さ d と散乱波の遅れ時間 Δt とは良い直線関係があり、き裂深さは ± 1 mmの精度で求められる。

信される。被検体にき裂がない場合には、散乱波はなんら阻止されることなく受波子に到達するが、き裂が存在する場合、き裂の深さの範囲で発生した散乱波はき裂によって阻止され受波子には到達せず、き裂の先端より深い領域からの散乱波が受波子に受信されることになるので、散乱波の受信時間 t は無欠陥の場合の t_n よりも、き裂深さ d_c に応じた時間 Δt だけ遅れる。したがって、 Δt を測定することにより、き裂深さが推定できる。

上述したような散乱波法によるき裂深さ測定結果の一例を図2(b)に示す。同図の結果から、深さ12mmまでのき裂を ± 1 mmの精度で推定できることが分かる。また、この方法では表示値とき裂深さとの間に良い直線関係が成り立つので、測定結果の信頼性が高く、しかも優れた検査能率が得られる。

2.3 伝熱管などの管内挿入式超音波探傷プローブ³⁾

熱交換器の伝熱管の検査を行なうために、管内に挿入可能で、かつ管の全面を探傷できる回転走査式管内挿入形の超音波探傷プローブを開発した。更に、U字形やヘリカルコイル形伝熱管のような曲管の中にもプローブを円滑に挿入するために、水流を用い、ムカデ風の原理を応用したプローブ駆動方式も開発している。

図3は試作されたプローブの外観を示すもので、内蔵されたマイクロモータによって微小な送・受波子を回転させ、管の全周が探傷できるようにしてある。回転走査に当たって送・受波子と信号ケーブルとの間の電気信号の伝達は、スリッピングリングとブラシ機構によって行なわせている。曲管部でもプローブが通過できるようにするために、回転式送・受波子やマイクロモータなどの構成部分は適当な径と長さの範囲に制限され、例えば曲げ半径100mm、内径約20mmの曲管に挿入するものでは1個の構成部分が外径14mm、長さ約50mm以下の寸法とした。プローブにはフィンが取り付けられ、これが水流を受けて前・後進の駆動力を与えると同時に、管内での送・受波子の調心の機能をも果たすよう考慮した。ケーブルには等間隔に蕨形の受圧体を取り付け、これが水流による駆動力をケーブルの各部分に与えるので、プローブとケーブルは長い曲管内にも円滑に挿入できる。

上述のようなプローブの開発によって、例えば、高速増殖炉の蒸気発生器に用いられるようなヘリカルコイル状伝熱管

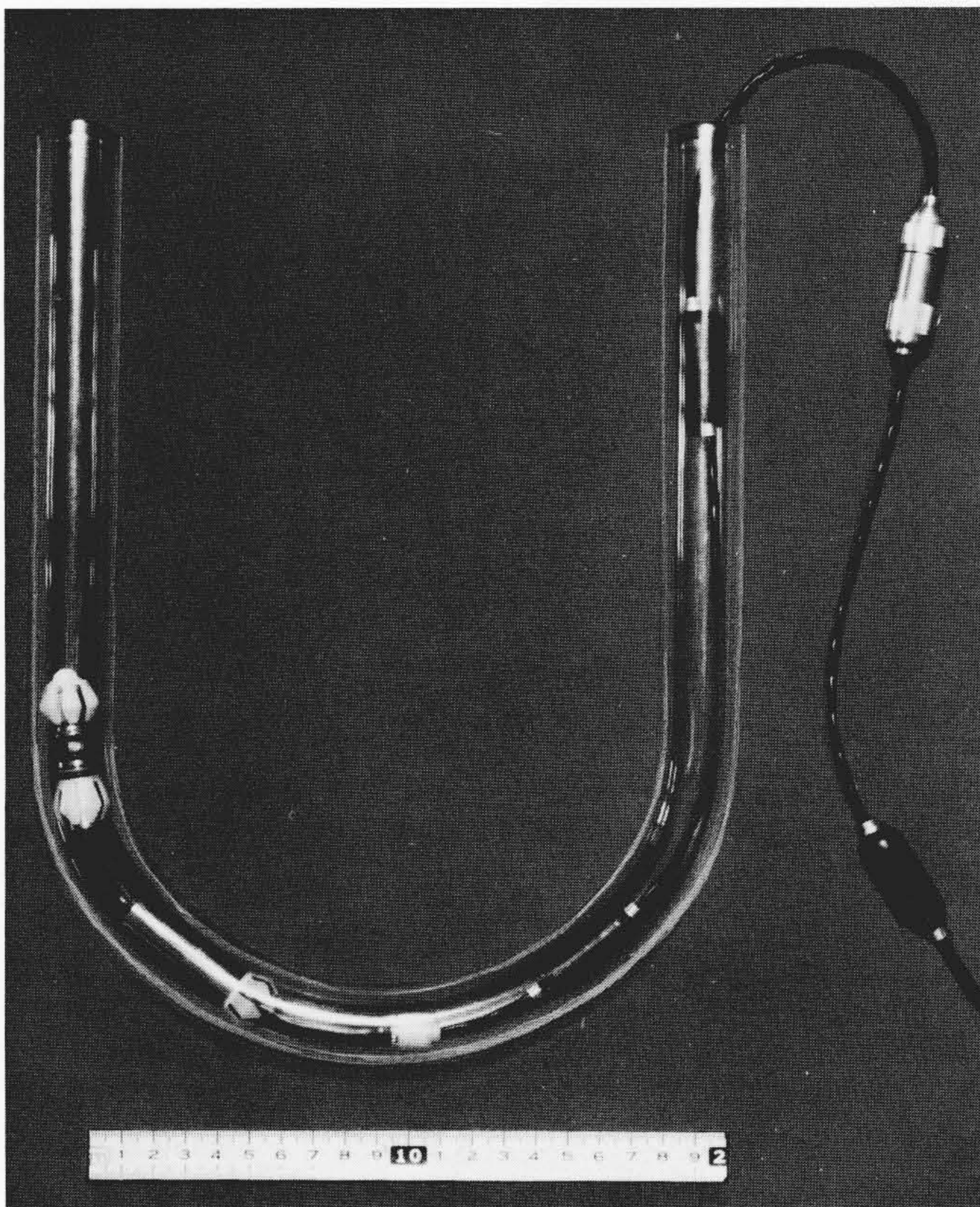


図3 管内挿入形超音波探傷プローブ 内径19mm, 曲率半径100mmの曲管内に挿入されたところを示す。フィンとケーブルに付けた受圧体が、水流を受けて前進する。

(全長約60m, コイル部巻径1,080mm, 巻数15ターン, 管外径25.4mm, 肉厚3.2mm)の全長にわたり, 欠陥検査を行なうことも可能になり, 超音波周波数5MHzで管壁に存在する深さ0.6mmの欠陥が検知できる。

この技術は, 熱交換器の伝熱管をはじめ各種の管に対して, 管内からの欠陥検査を可能にするので, プラントや機器の健全性の点検に大きく寄与するものと期待される。

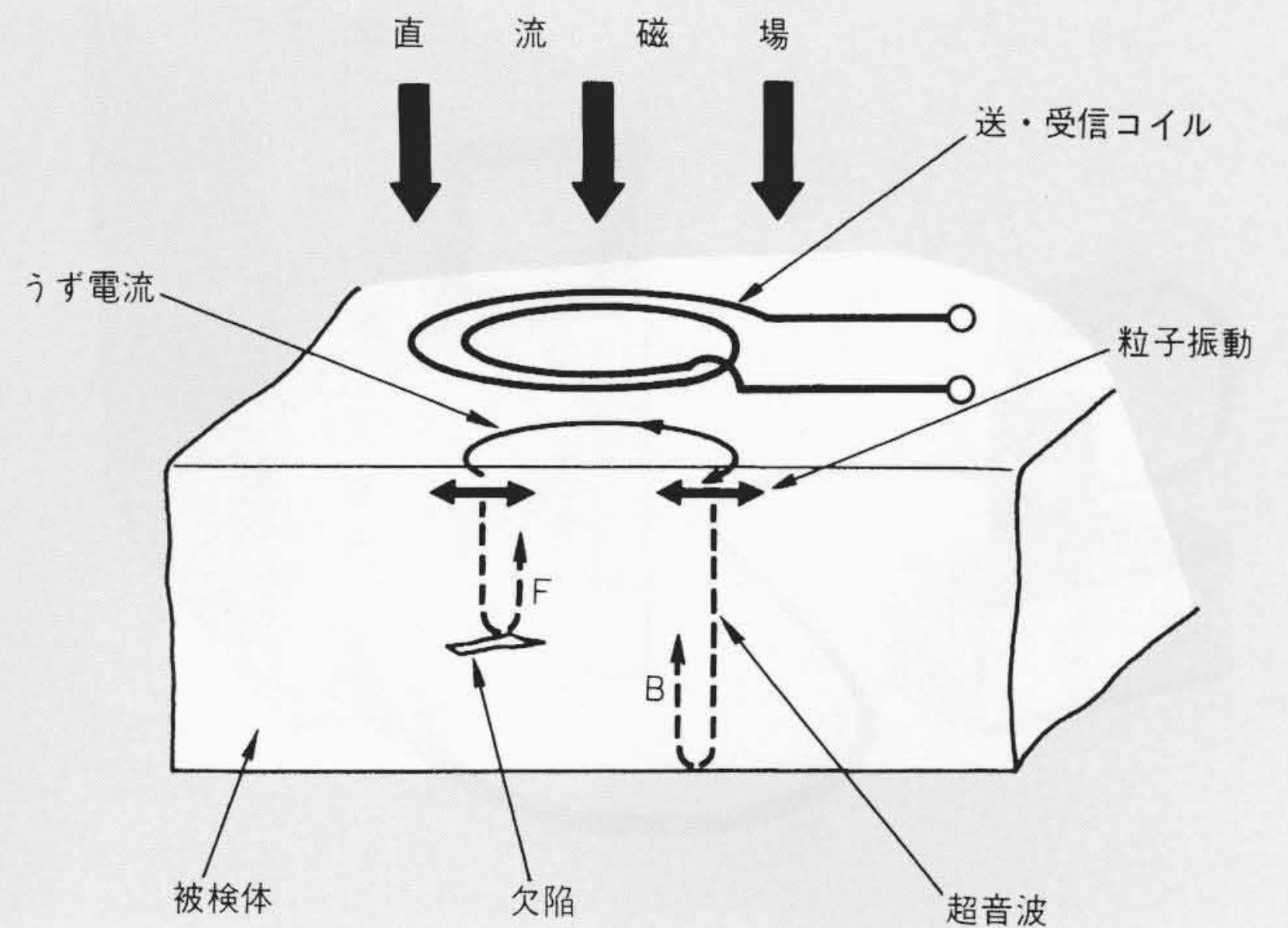
2.4 電磁気的方法による超音波送・受信

圧電素子を用いた通常の超音波探触子では, 液体媒質を用いて被検体との音響的接触を行なわせ, 超音波の送・受信がなされている。ところが, 被検体が300℃以上の高温の場合や, 表面状態が粗いとか酸化スケールが付着しているような場合は, 音響的接触が困難となる。

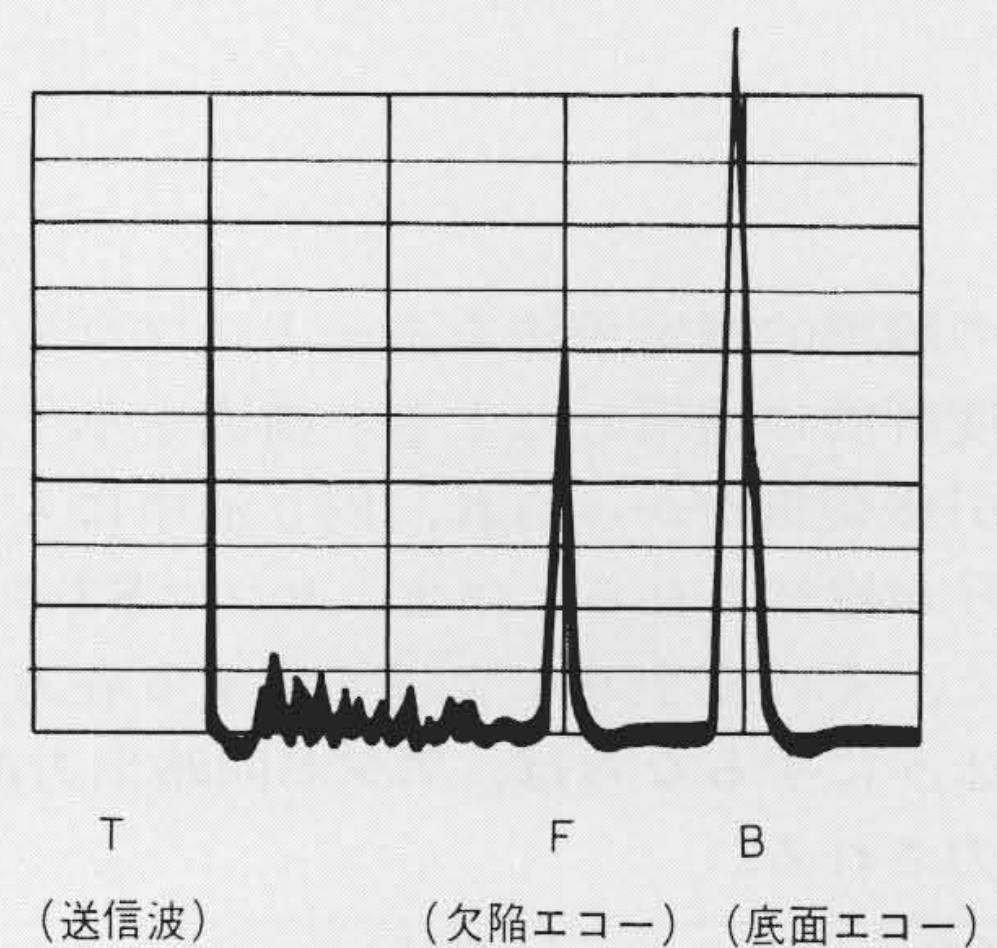
そこで, 液体媒質を用いず, 電磁気的作用によって非接触的に被検体内に超音波を送出し, かつ受信するいわゆる「電磁超音波探傷法」によって上記の問題を解決しようとする研究が進められている⁴⁾。

図4は電磁超音波探傷法の原理を示すもので, 金属被検材に近接して送・受信コイルを置き, まず送信側に高周波インパルス電流を流すと, 被検材表面にうず電流が流れる。この部分に直流強磁場を加えておくと, うず電流との相互作用に基づくローレンツ力が働き, 被検体面に高周波応力を生じて超音波となる。

このようにして発生した超音波が材料内を伝搬し, 再び表面に達すると, その部分に粒子振動を生じ, これに強磁場が加えられることによって誘導電流が流れる。この高周波電流を, 受信コイルを近接させて検出することにより超音波が受信される。



(a) 原理図



(b) 信号波形

図4 電磁超音波探傷法の原理 本図(b)の信号波形は, 図5の装置で表示された信号の観測波形である。

図5に最近日立製作所で製品化した電磁超音波探傷器の外観を示す。本装置のヘッド部(重量約2kg)の大部分を占める電磁石によって, 被検体表面に約2万ガウスの磁場が印加され, 周波数2MHzの超音波パルスを送・受信する。探傷性能としては, 例えば鋼材中40~50mmの距離で直径2mmの円形欠陥が十分検知可能である。

電磁超音波探傷法では, 被検体に対して加える磁場の方向が探傷面に対して垂直ならば横波が送・受信され, 平行ならば縦波となるので, 目的に応じて波モードを選択することができる。

3 AE計測法による材料及び機器診断

AE法とは, 材料や構造物が破壊する前に発生する弾性波(主に超音波)を検出して, 機器や構造物の安全性監視手段に役立たせようとする手法である。本章では, このAE法を材料及び機器診断に適用するに当たって開発した検出及び信号処理技術と, その適用例について述べる。

3.1 AEゾーンの論理的標定手法とチェーンの強度評価⁵⁾

AE発生源のゾーン標定が, 簡単な論理回路で可能な論理的標定手法を開発した。これは多チャネル検出で, 相隣り合う三つのチャネルで受信されたAE信号で作られる方形波出力の論理積をとることによって, AE発生ゾーンを標定する方法で, 雑音弁別性が良く連続監視に適している。図6に,

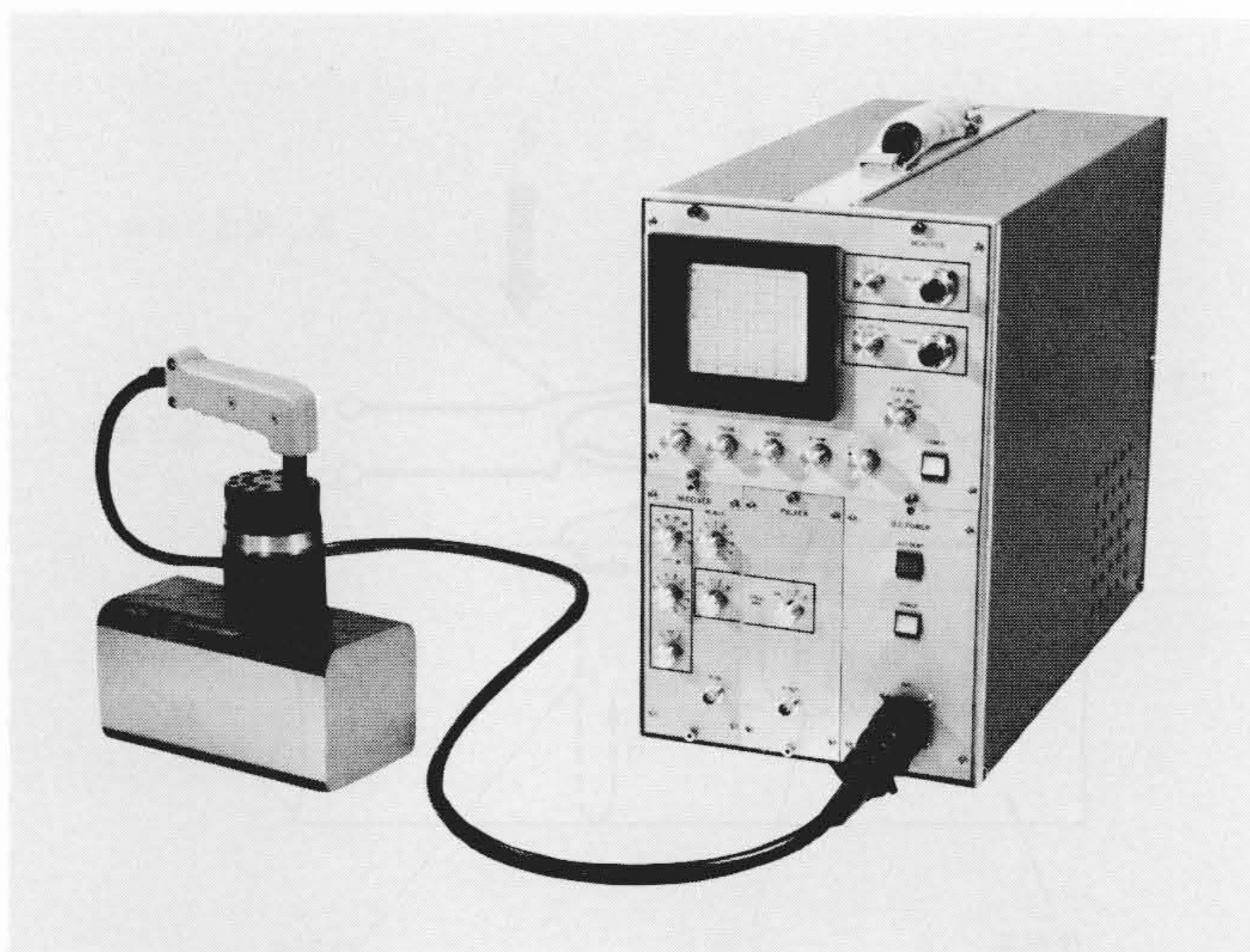


図5 電磁超音波探傷装置の外観 探傷ヘッド部は外形70mm、高さ110mmで、重量は約2kgである。

AEゾーンの論理的標定手法をモートルブロック用リンクチェーンの強度評価に適用したときの構成を示す。供試チェーンは油中で引張荷重がかけられ、同じ油中に入れたAEセンサにより信号が検知される。いま、センサS3の近くにAE発生源があると、その立上りによって生ずる各方形波の時間幅 T を次式のようにするならば、アンド回路出力A2にだけ論理積信号が出力される。

$$\frac{\sqrt{\left(\frac{3}{2}D\right)^2 + d^2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + d^2}}{v} \leq T < \frac{\sqrt{(2D)^2 + d^2} - d}{v}$$

ここに D : センサ間距離(m)

d : 供試チェーンとセンサ間の距離(m)

v : 音響伝搬媒体の音速(m/s)

図7は欠陥リンク付チェーンのAE発生特性例を示す。同図で、引張荷重比 K_p はこのチェーンの基準荷重に対する相対

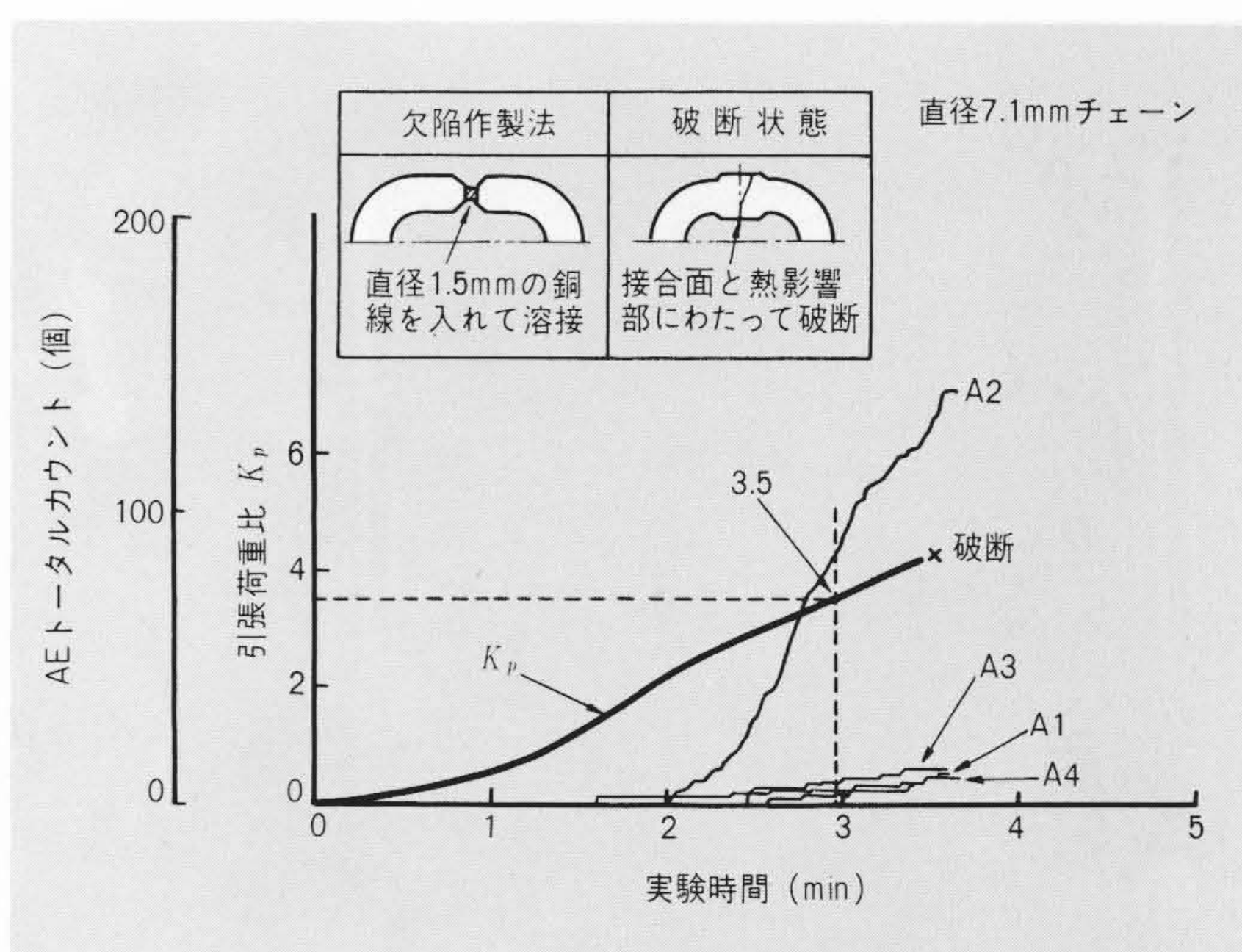


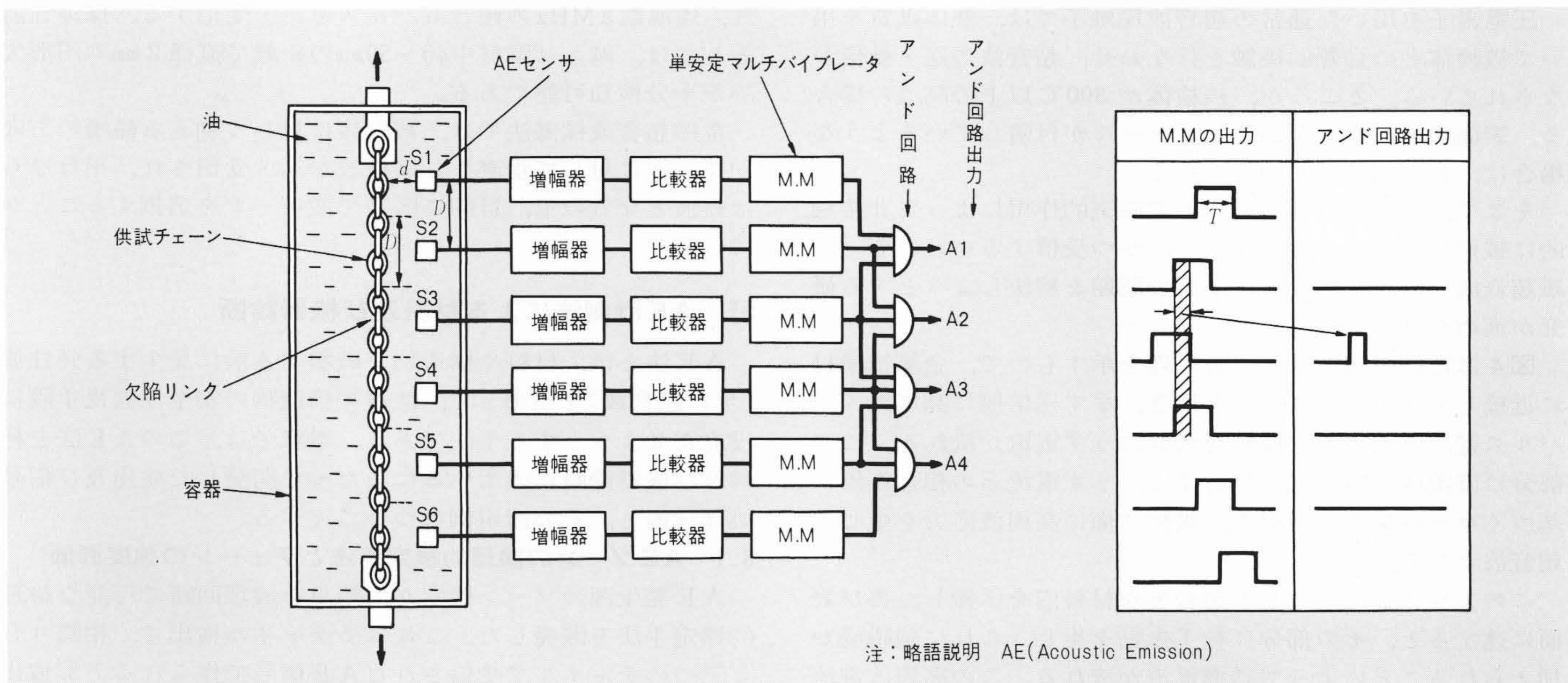
図7 欠陥リンク付チェーンのAE発生特性 実験に供した試料は、モートルブロック用リンクチェーン(直径7.1mm)である。 $K_p=3.5$ が耐力荷重試験値となる。

荷重を表わす。欠陥リンクのあるゾーンの出力A2には、 $K_p=2$ を超えるあたりからカウントが増加し始め、耐力荷重試験値 $K_p=3.5$ では、他のゾーンのAEカウントと約80カウントの相違があるため、欠陥リンクの摘出が可能である。

3.2 回転機異常診断用無線式AE検出器

回転機の回転部に発生する異常や、その原因箇所を早期に診断検知するための無線式AE検出器を開発した。特に、本検出器は大形回転機の異常診断を主目的とするもので、回転中の回転子内でのき裂や焼付き、あるいはこすれなどの異常によって発生するAE信号や高周波異常音を検出し、異常を早期に発見して、予防保全に役立てようとするものである。

図8にこの無線式AE検出器の構成を示す。すなわち、AEセンサ、送信モジュール、受信器、信号処理回路、モニタ及び電源供給部から成っており、電源供給部は誘導電源方式とバッテリー方式とがある。本検出器は搬送周波数範囲88~108



注: 略語説明 AE(Acoustic Emission)

図6 AEゾーンの論理的標定のための装置構成例 行なった。

供試チェーンを油中に入れ、引張荷重をかける方法をとっている。実験は $D=40$ mm、 $d=30$ mmで

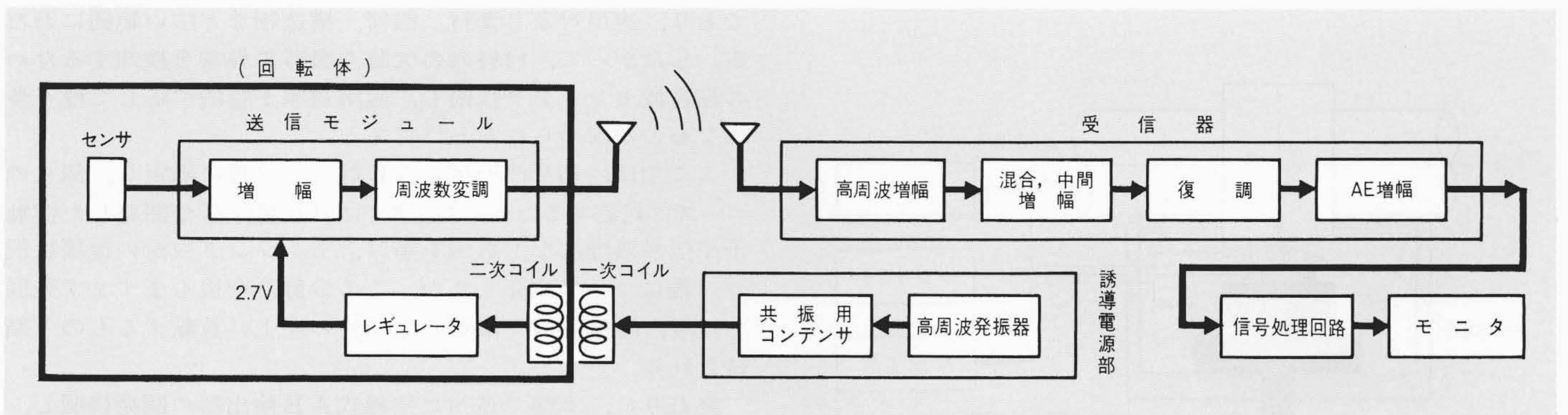


図8 無線式AE検出器の構成 AE信号の有効周波数帯域である50～250kHzがダイレクトFM(周波数変調)で伝送される。電源はバッテリー方式の場合、約100時間使用できる。

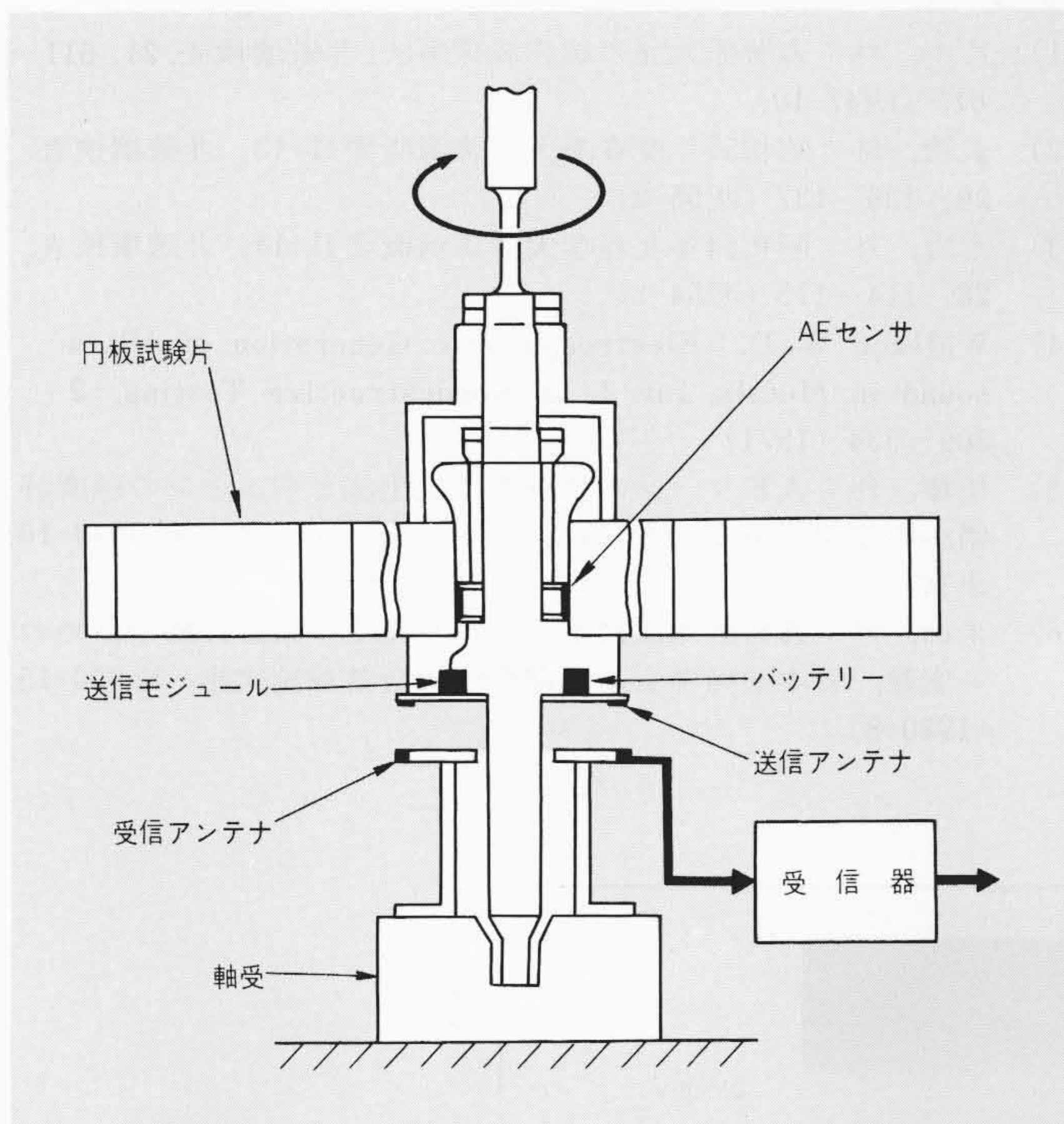


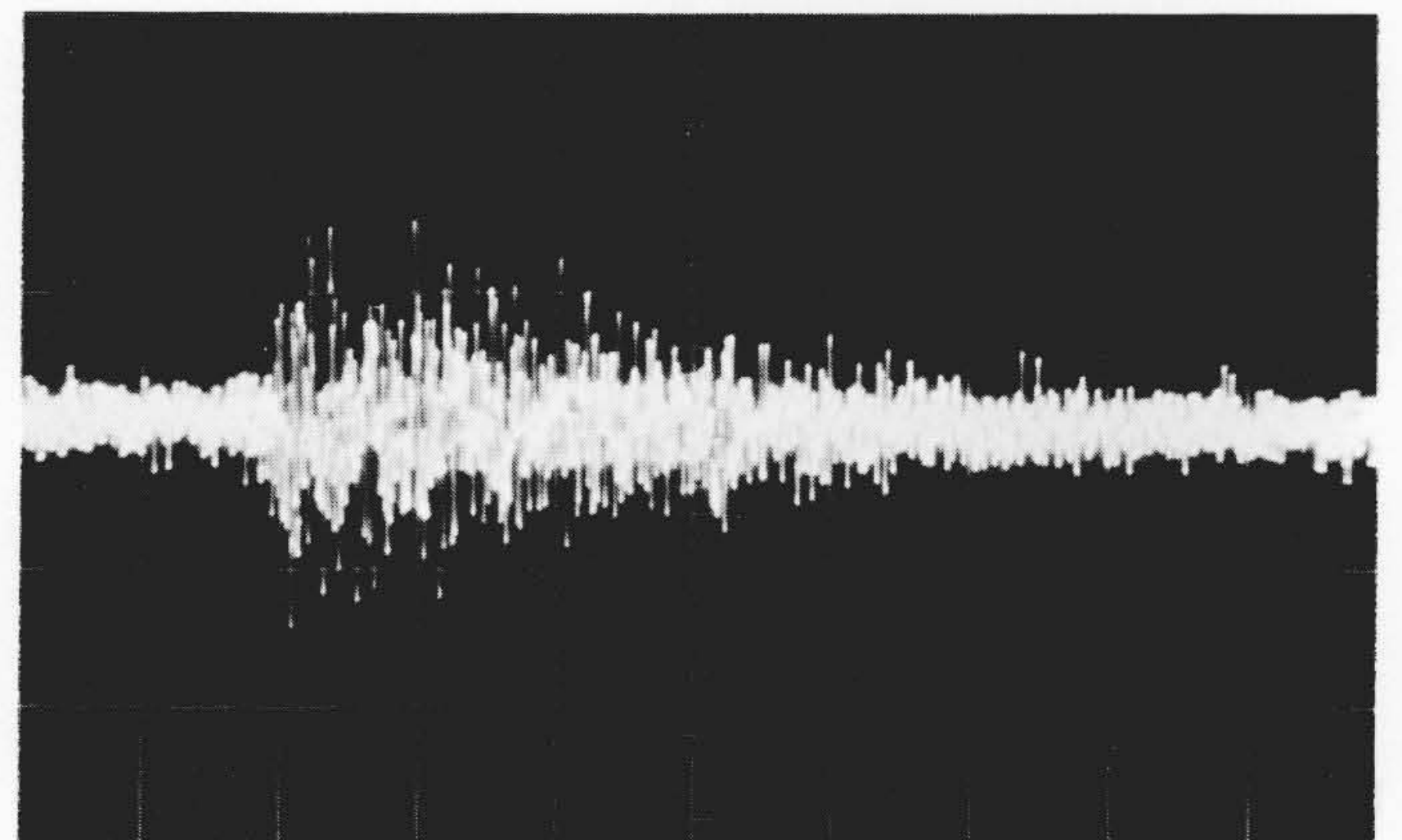
図9 無線式AE検出器の回転破壊試験への適用 円板試験片は、発電機ロータを模擬した形状で、寸法は直径786mm×76mmである。

MHzに対し、信号周波数帯域としてはAE計測上最も使用頻度の高い50～250kHzの信号が8チャンネル同時に伝送できる。送信モジュールは直径28.5mm×60mmと小形で、周囲温度0～100℃、遠心加速度15,000Gに耐えるようになっている。

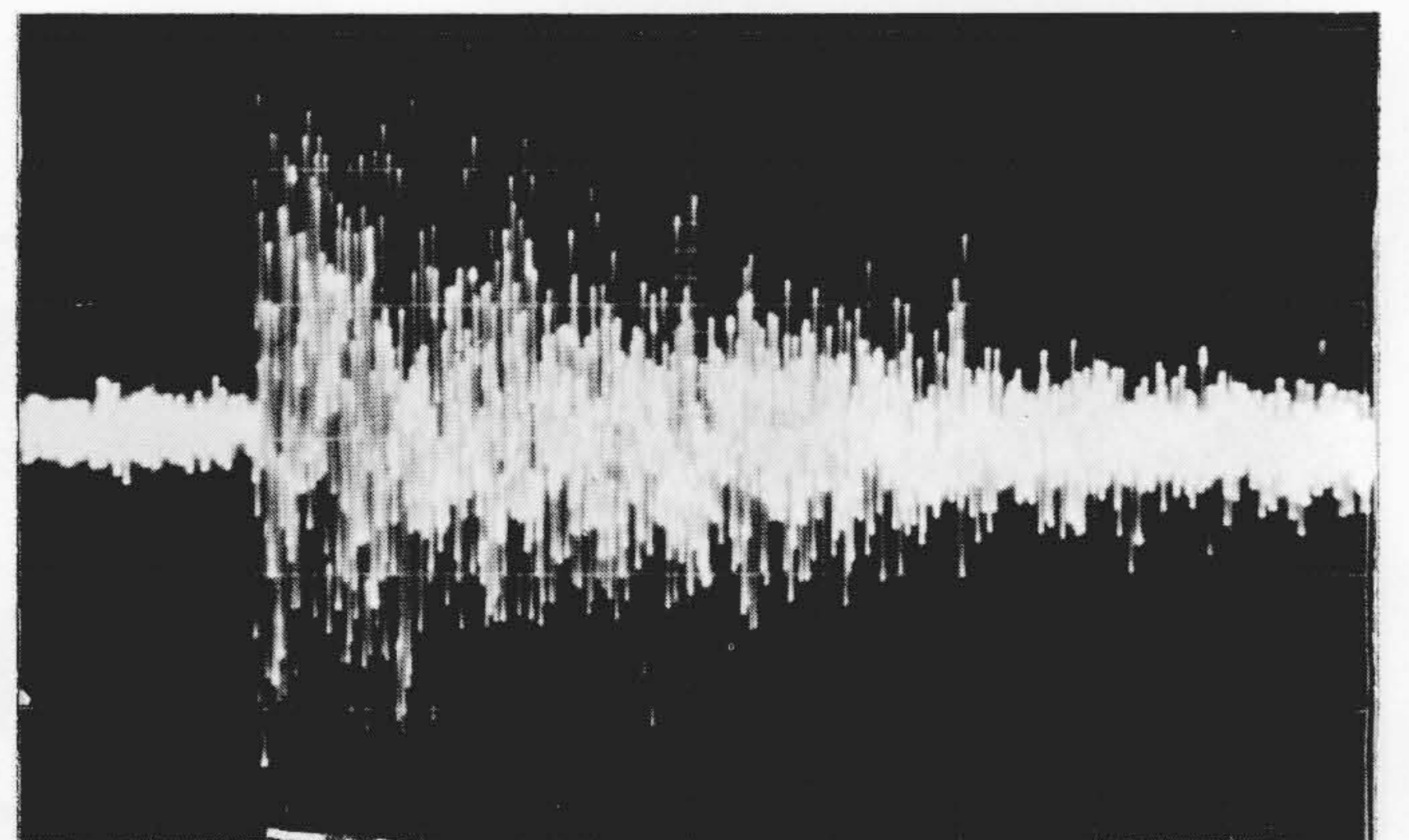
次に、本器の適用例として発電機ロータを模擬した円板試験片(直径786mm×76mm、スロット加工付)による回転破壊試験に用いた結果について述べる。図9に示すように、円板試験片の中心孔にリングシュウ状のAEセンサを設置し、同試験片が遠心力によって破壊するまで回転数を上げて、そのとき発生するAE特性を観測した。この実験では、図10に示すように回転速度が上昇中に塑性変形に伴うAEや、破壊直前にき裂の進展に伴う大振幅のAE信号が検知され、この検出器が高い検出感度と信頼性をもっており、十分使用できることを確認した。

3.3 AE計測法による滑り軸受の損傷診断⁶⁾

滑り軸受の焼損原因である低速時のメタルワイプ(摺動損傷)や高速時の片当りの検出を、AE計測法を用いて検知し、



(a) 回転速度上昇中に発生したAE波



(b) 破壊直前に発生したAE波

図10 回転破壊試験で観測されたAE波形例 (a)はスロット部のウェッジが塑性変形した際のAE、(b)はティース部のき裂進展に伴うAEと思われる。いずれも目盛は5V/div, 0.5ms/divである。

軸受の異常を早期に診断する方法を開発した。ここでは、メタルワイプ診断でのワイプ発生とAEの関係を、図11に示す模擬軸受を用いた実験により説明する。図12に、ワイプ発生過程でのAE波形を示す。メタルワイプ発生初期は、バビットとジャーナル間の潤滑油欠損により、ごく軽微な金属接触が周期的に生じ、この金属接触による局部的塑性変形により図12(a)から(b)に示すようなAE波が発生する。次に、メタルワイプ進展とともに金属接触領域が拡大し、この損傷した部分が変形又ははく離を起こし、同図(c)に示すような立上りの急峻なAE波が混在してくる。更に、この現象が進展すると変形又ははく離による量のほうが多くなり、立上りの急峻なAE

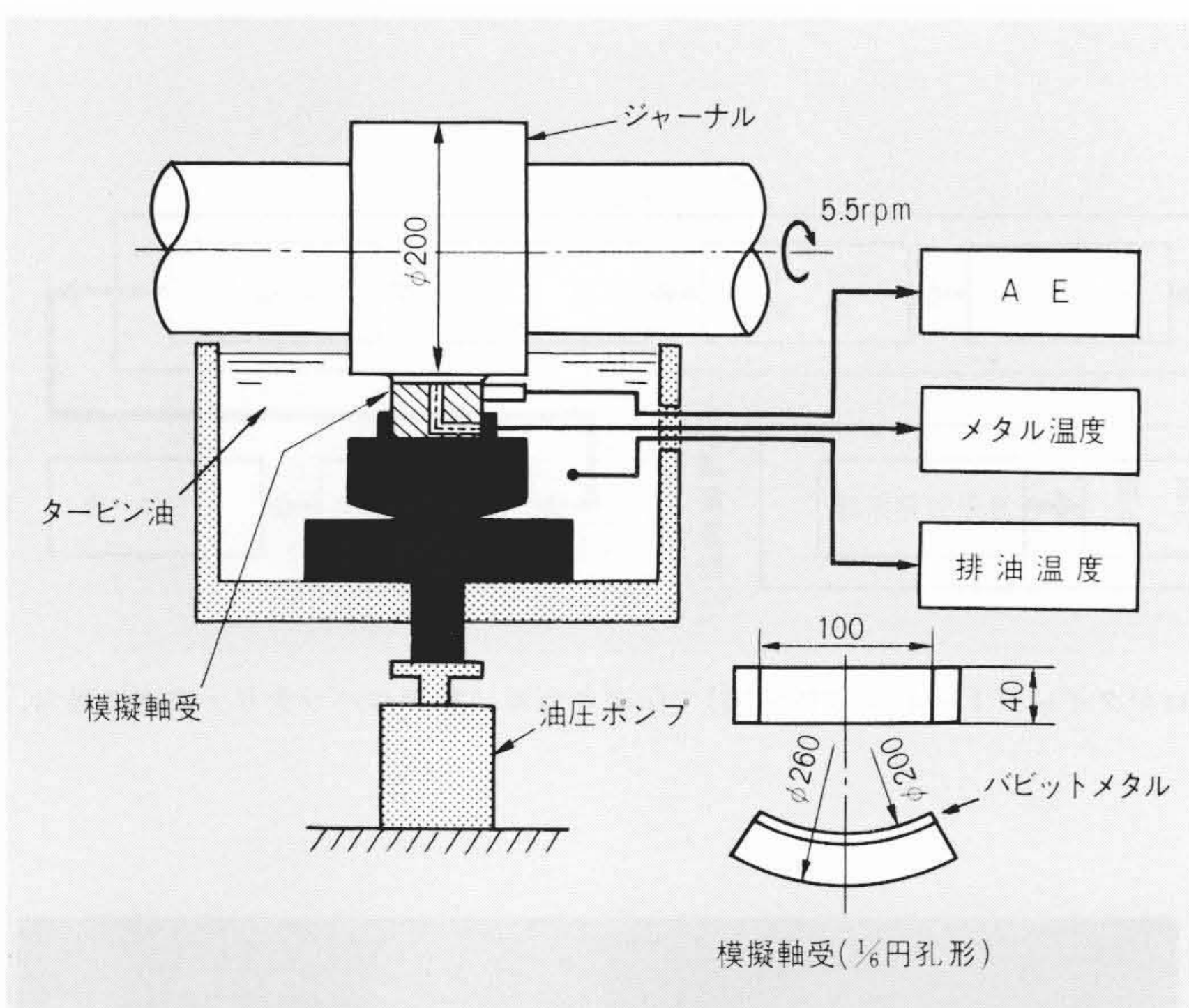


図11 模擬軸受によるメタルワイプ実験装置 油圧ポンプにより軸受を押し上げ、故意にメタルワイプを発生させて、そのときのAE特性を測定した。

波のほうが振幅も大きく大半を占めるようになる。

以上、模擬軸受について述べたが、実機相当の軸受でも同様な結果が得られており、実機監視に当たっては図12(b)に示すような初期段階のうちに、運転を停止することが望ましい。

4 結 言

超音波によってもたらされる物体内部の状況に関する情報の種類は、周波数、位相、時間、位置、強度など極めて多彩

であり、適用対象も素材、機器、構造物など広い範囲にわたる。したがって、材料内の欠陥や機器の異常を検知するための超音波センシング技術も、適用対象と目的に応じて種々多様なものが求められるわけである。

ここでは、超音波探傷とAE計測の分野に限定し、個々のニーズに対応するため、これまでに日立製作所で開発した探触子や信号処理法など数例を挙げ、センシング技術の進展状況の一端について紹介したが、この分野は今後もますます発展を続け、産業施設や機器の信頼性の向上に貢献するものと期待される。

終わりに、本稿で述べた無線式AE検出器の開発に関し、御協力いただいた株式会社立山電子・代表取締役高橋擴一氏に対し厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 片木，外：表層部欠陥の超音波探傷法，非破壊検査，21，611～615（昭47-10）
- 2) 武捨，外：昭和55年度春季大会講演概要Ⅱ-13，非破壊検査，29，136～137（昭55-2）
- 3) 木野，外：昭和54年度春季大会講演概要Ⅱ-14，非破壊検査，28，114～115（昭54-2）
- 4) Wallace W. D. : Electromagnetic Generation of Ultrasound in Metals, Int. J. of Nondestructive Testing, 2, 309～334 (1971)
- 5) 佐藤，外：AEゾーンの論理的標定手法とチェーンの強度評価への応用，第2回AE総合コンファレンス論文集(1979-10，東京)
- 6) 米山，外：AE計測法によるすべり軸受の損傷診断のための一実験，日本機械学会第58期全国大会講演論文集，No.800-15（1980-8）

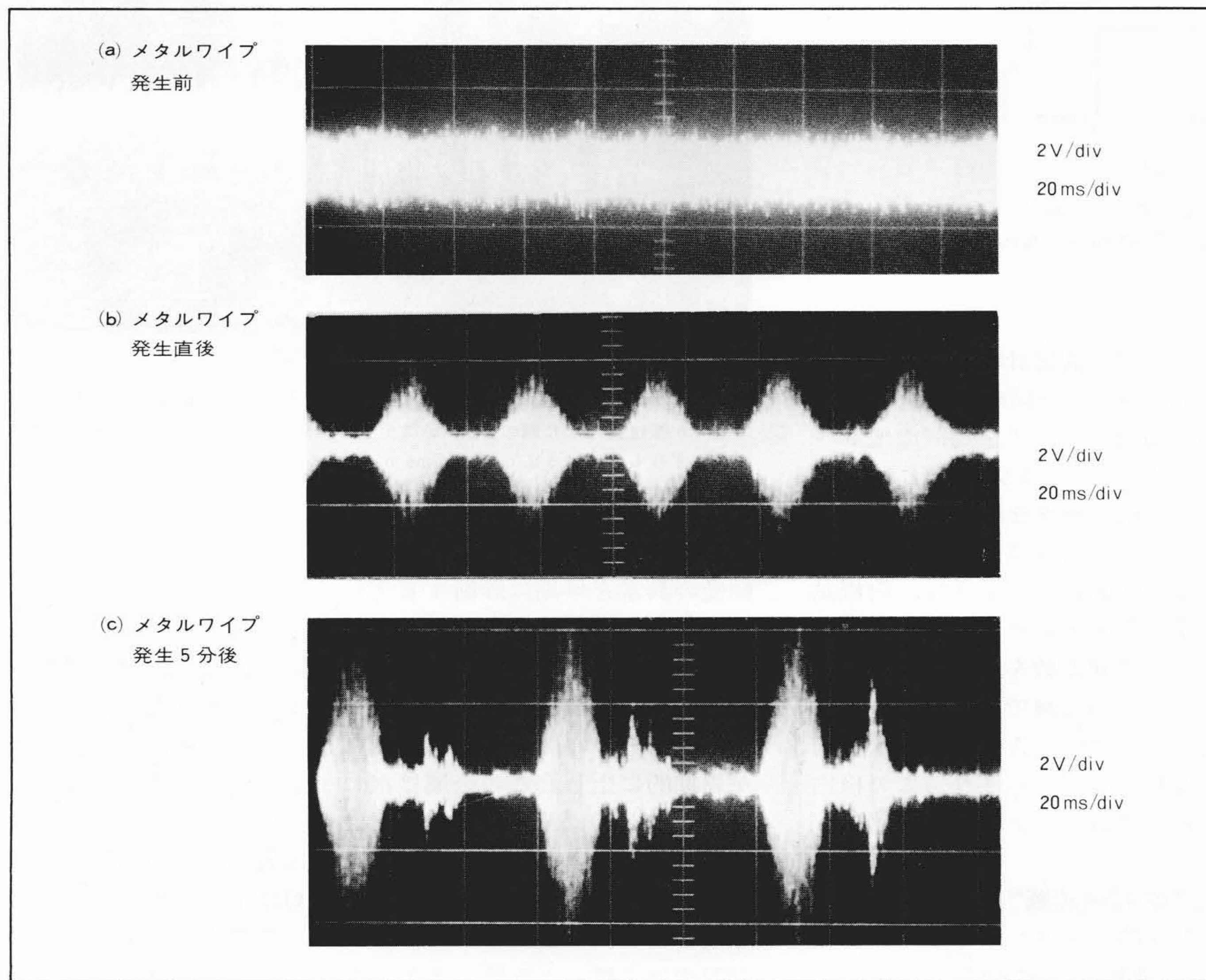


図12 メタルワイプとAE波形の関係 (a)は正常時，(b)は初期状態，(c)は損傷が進んだ状態のAE波を示す。