

建設機械部品検査への超音波利用新技術

New Techniques Using Ultrasonic Wave for Parts Inspection of Construction Machinery

建設機械での構造物や機器の高信頼化及び稼働率向上を目的として、超音波利用による非破壊検査新技術、すなわち欠陥寸法高精度測定法及び接触面圧測定法を開発した。

これらの測定法によれば、欠陥寸法を約±1mm、接触面圧を約±10%の精度で簡単に測定することができる。

これらの測定法を建設機械部品の品質管理及び予防保全手段として適用し、品質、信頼性の向上及び安全性の確保を図り、製品の現場稼働率の向上に役立てている。

小倉幸夫* Yukio Ogura

宮島 猛** Takeshi Miyajima

1 緒 言

建設機械は、一般に悪環境下で複雑な変動、衝撃荷重を受けるなど過酷な条件下で使用される。構造物や機器の破損を防止し、機械の稼働率を向上させるためには、材料や溶接部などに内在する欠陥を検出する非破壊検査の適用が必要である。また、最近破壊力学や有限要素法などの適用により構造物や機器の強度評価が的確に行なえるようになっている。これらの手法を有効に活用するためには、非破壊検査により欠陥の寸法や形状を定量的に評価することが必要である。

非破壊検査法としては、現在、放射線、超音波、電気、磁気、赤外線などを利用した各種の方法が実用されている。しかし、これらの方法は概して欠陥の検出には適するが、欠陥の寸法や形状を定量かつ高精度で評価するという点では十分でなく多くの問題がある。

これらの問題点を解決するため、非破壊検査手法として、新たに表面波、縦波散乱波などに着目した超音波利用による欠陥寸法高精度測定法を開発した。また、ブッシングやボルト締結体などの機器接触部の予防保全技術として、接触部の面圧を定量的に測定できる方法を開発した。これらの方法を実用した結果、建設機械部品の品質管理及び予防保全技術として十分有用であることを検証した。

本稿では、開発したこれら測定法の原理、測定精度、特徴及び適用例について述べる。

2 超音波探傷による欠陥寸法高精度測定法

2.1 モード変換回転表面波法

本法の欠陥寸法測定原理を図1に示す。いま、斜角探触子から発した横波が面状欠陥に入射すると、一部の横波は欠陥の上部先端で反射され探触子に戻る(Sエコー)。そして一部は欠陥の上部先端で表面波にモード変換され、それが欠陥の両側に沿って伝搬する。伝搬した表面波が欠陥の下部先端にさしかかると、同図(a)に示すように一部は反射し、一部は同図(b)に示すように先端を回って更に伝搬する。欠陥の下部先端で反射もしくは回った表面波は、欠陥の上部先端で再び横波にモード変換され、その横波が探触子に戻る(Rエコー)。面状欠陥は一般に欠陥の幅が小さい。このような場合、同図(a)及び(b)での欠陥に対する表面波の伝搬に要する時間は双方ほぼ同じとなる。このためRエコーとしては単一のエコーと

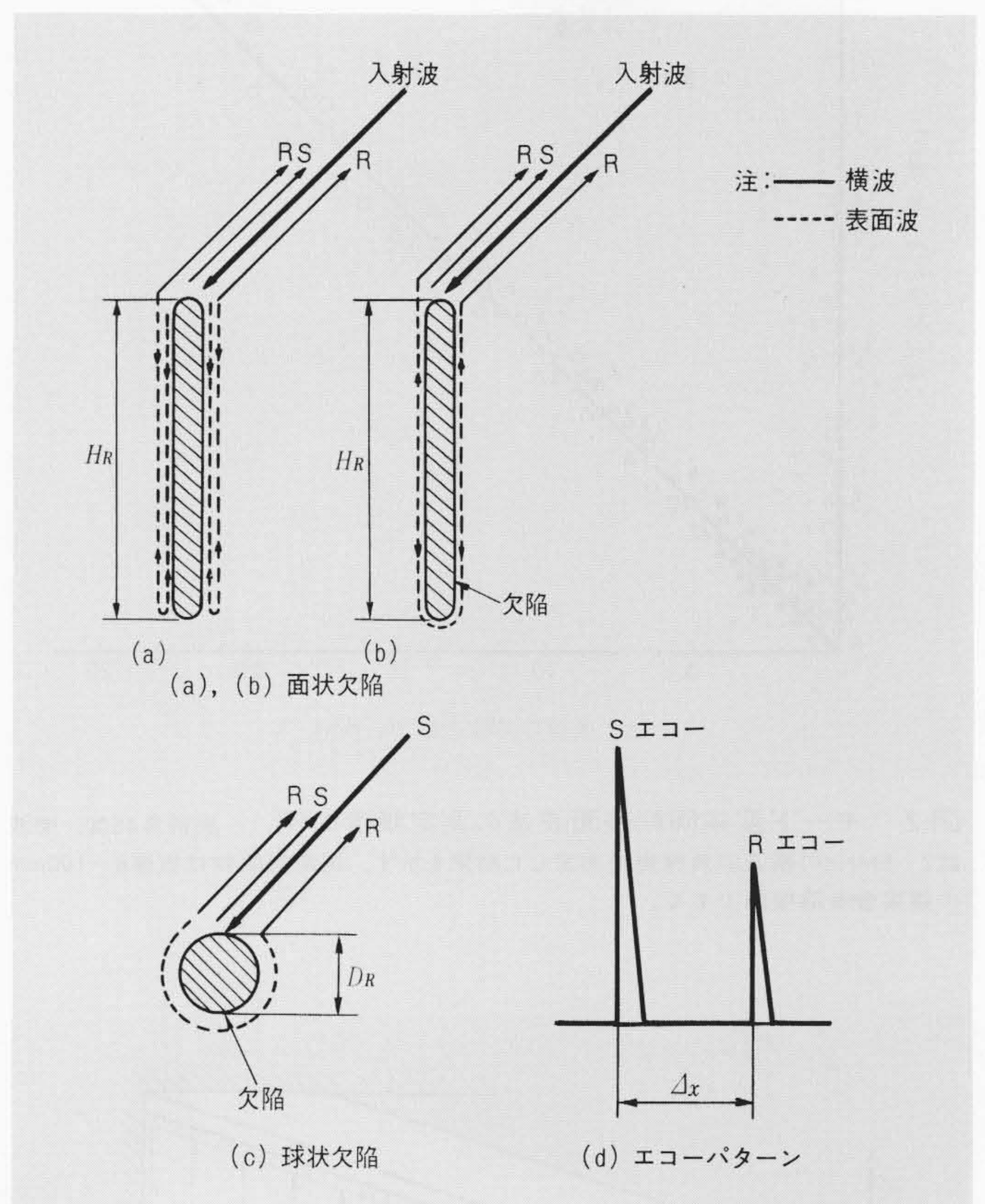


図1 モード変換回転表面波法の原理 欠陥での直接反射による横波のエコーと、欠陥で横波・表面波相互のモード変換に基づいて得られるエコーとのビーム路程差を利用して、欠陥寸法を測定する方法である。

なる。

一方、球状欠陥の場合は、図1(c)に示すように、横波が欠陥に入射すると、一部は横波として反射され探触子に戻る(Sエコー)。そして一部は表面波にモード変換されたのち欠陥の周囲を伝搬する。この表面波は伝搬しながら同時に横波にモード変換される。そしてはじめての横波の入射点でモード変換された横波が探触子に戻り、エコーとなる(Rエコー)。

したがって、これらのエコーをAスコープ表示探傷器のブ

* 日立建機株式会社土浦工場 工学博士 ** 日立建機株式会社土浦工場

ブラウン管で観察すると、同図(d)に示すように、まずSエコーが得られその後 Δx だけ遅れてRエコーが得られる。そこで、試験体の横波の音速を C_S 、表面波の音速を C_R とし、ブラウン管の時間軸を横波基準とすると、面状欠陥の寸法 H_R は(1)式で、また立体欠陥の直径 D_R は(2)式で求められる¹⁾。

$$H_R = \frac{C_R}{C_S} \times \Delta x \quad \cdots (1)$$

$$D_R = \frac{2 C_R}{\pi C_S} \times \Delta x \quad \cdots (2)$$

本法の特徴を述べると次のとおりである。

(1) 欠陥の形状を問わず測定が可能であり、また欠陥形状を推定することもできる。

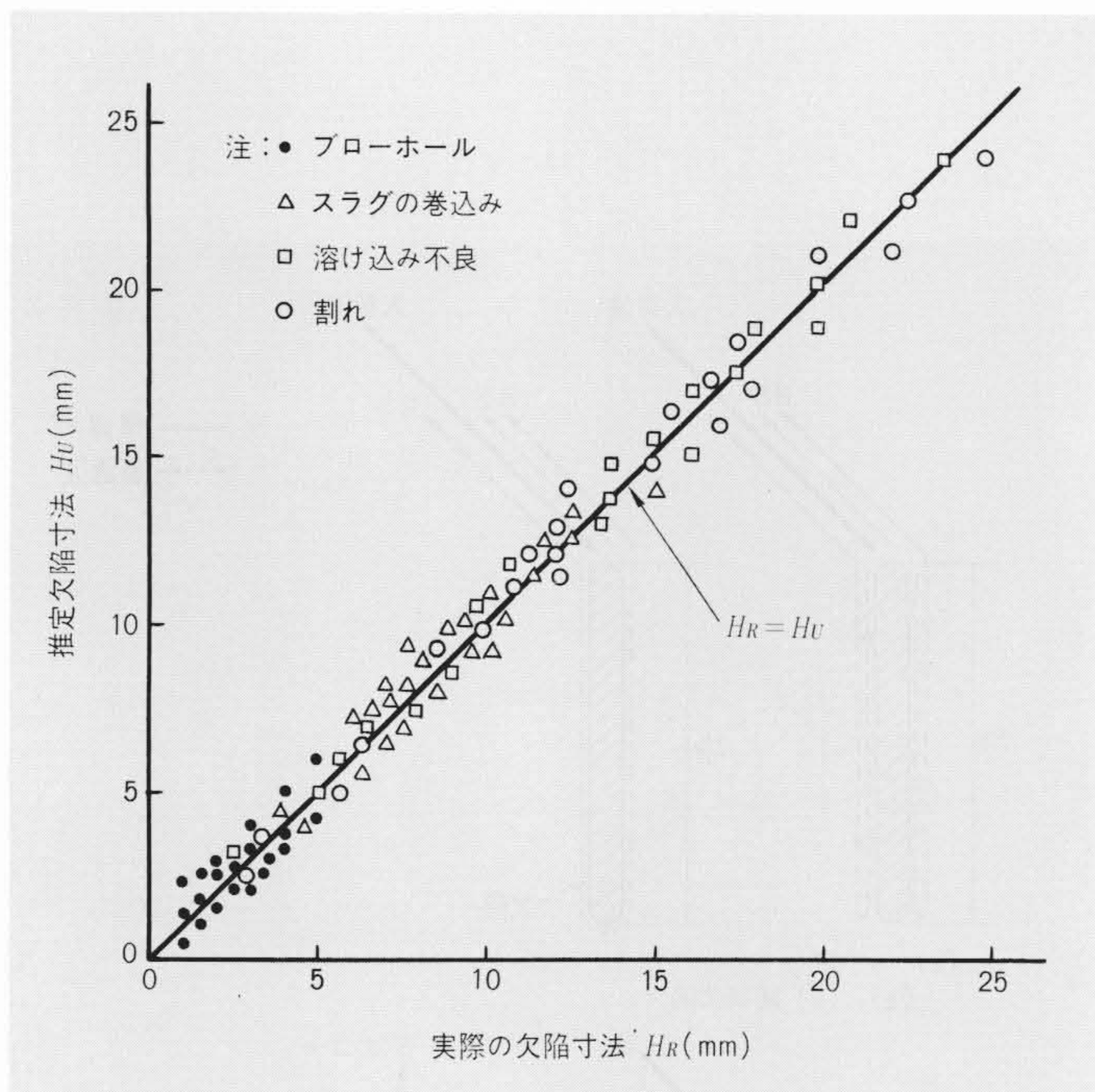


図2 モード変換回転表面波法の測定精度の例 屈折角45度、周波数2～5MHzの横波斜角探傷で測定した結果を示す。測定対象物は板厚8～100mmの鋼突合せ溶接部である。

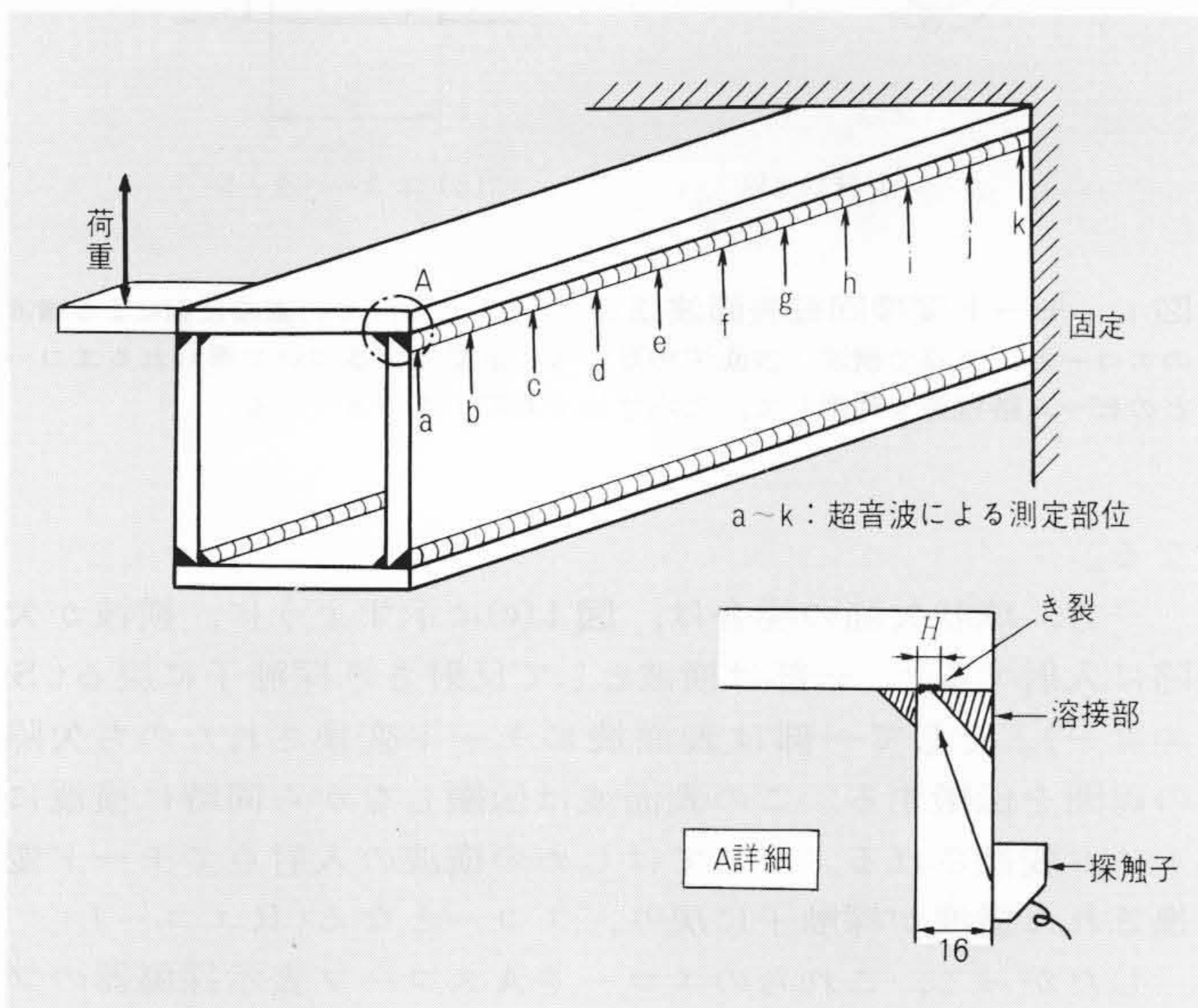


図3 箱形溶接構造物のねじり試験中でのき裂寸法測定 溶接線長手方向に対して等間隔でき裂進展寸法を測定した。実験は斜角45度法で直射法による。

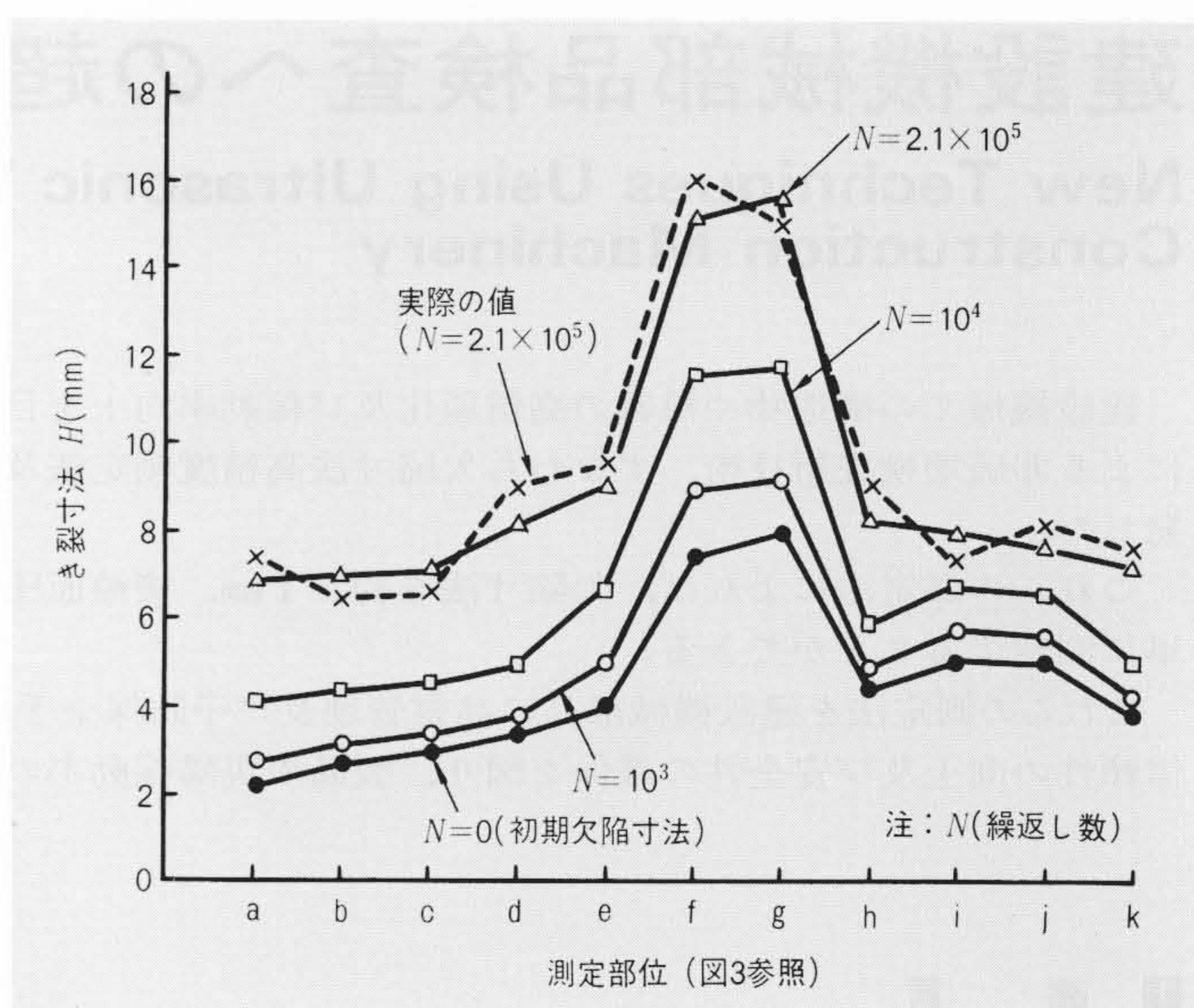


図4 測定部位のき裂進展状況及び測定精度 図3に示す条件下で、モード変換回転表面波法によって測定した結果を示す。破線で示した値は、試験後切断して測定した値である。

- (2) 強度上特に重要となる板面に対して、垂直な内部面状欠陥の欠陥高さ(板厚方向の欠陥寸法)を測定することができる。
- (3) 通常使用されているAスコープ表示の探傷器及び通常の探触子で測定ができる。
- (4) 測定が簡単である。

本法を板厚8～100mmの鋼突合せ溶接部に適用し、測定精度を調べた一例を図2に示す。面状、立体状欠陥いずれもおおむね±1mm以内の誤差で欠陥高さを推定できることが分かる。なお、同図中の実際の欠陥寸法とは、超音波探傷後、試験体を切断又はガウジングして測定した板厚方向の欠陥寸法である。

図3に示すような条件下で箱形溶接構造物のねじり試験を行ない、本法を適用してき裂の進展程度を調査した結果を図4に示す。き裂が一部表面に出現した時点で試験体を切断し、実際のき裂寸法を測定した結果を同図中の破線で示すが、超音波による測定結果と0.5mm以内の誤差で合致しており、本法によりき裂進展寸法を正確に測定できることが分かる。

2.2 欠陥先端における縦波散乱波を利用する方法

図5に示すように、面状欠陥に対して縦波をほぼ平行に入射させると、欠陥上下部先端で散乱されるために、欠陥の上部及び下部先端からのエコー F_U 及び F_L が得られる。 F_U エコーと F_L エコーのビーム路程差は欠陥高さ H と等しいので、ビーム路程差から欠陥高さを求めることができる²⁾。

本法は厚板の突合せ溶接部でのき裂や溶け込み不良の欠陥高さを測定に適し、広帯域周波数特性をもつ探触子を使用したときに特に適用性、測定精度が良い。

本法を板厚50mmの50kg級高張力鋼の突合せ溶接部に適用し、内部溶け込み不良の欠陥高さを測定精度を調べたが、欠陥高さをおおむね±1mmの精度で測定できることを確認している。

日立建機株式会社では、以上の測定方法を建設機械、特に油圧ショベルのフロントや足回りの溶接構造物、鋳鍛鋼部品などに適用しているが、これにより製作段階での合理的品質管理が可能となり、従来に比較して格段の品質向上が図れるようになった。また建設機械稼働現場での予防保全技術として活用を図り、事故未然防止に威力を発揮するとともに、信頼性の向上、安全性の確保に大いに役立っている。

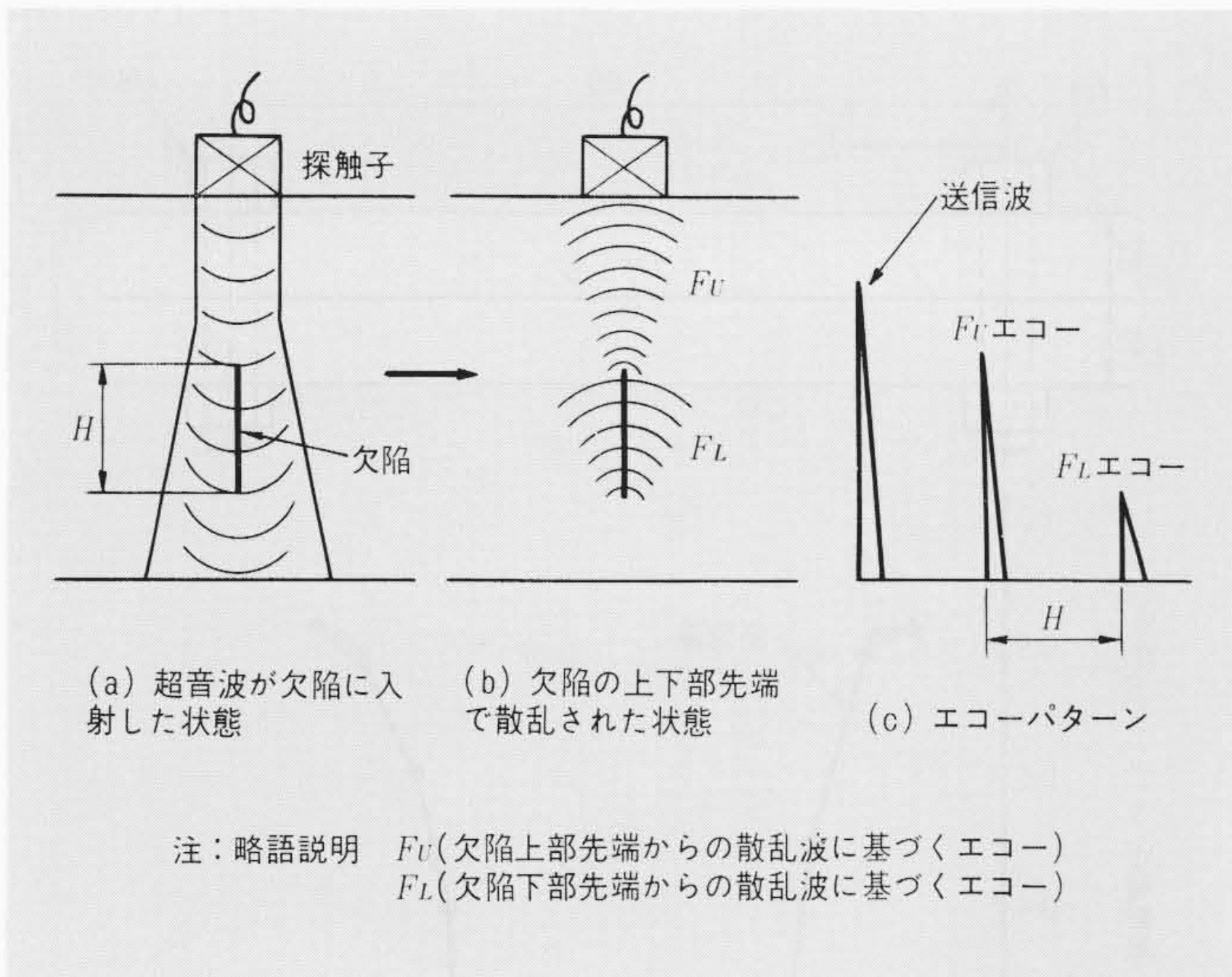


図5 欠陥先端の縦波散乱波を利用して欠陥寸法を求める法 本図中、(a)は超音波が欠陥に入射した状態を示し、(b)は欠陥上下部先端で散乱され球面波状に広がってエコーとなる様子を示す。 F_U エコーと F_L エコーのビーム路程差から欠陥寸法を求めることができる。

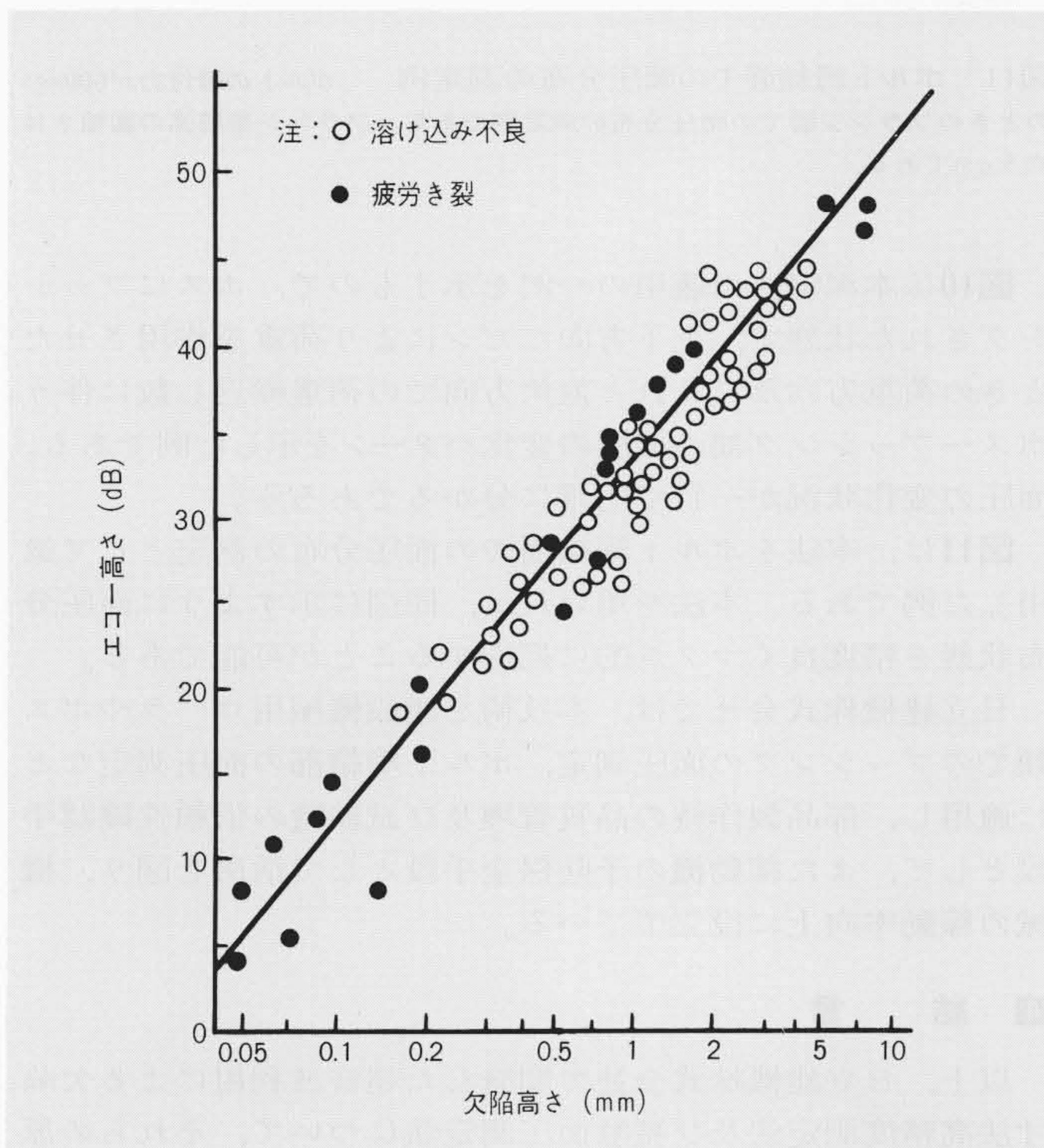


図6 薄肉小径管溶接部での欠陥高さとのエコー高さの関係 広帯域周波数特性をもつ高分解能斜角探触子を使用したときの結果を示す。エコー高さに対する欠陥高さのばらつきは、おおむね $\pm 20\%$ である。

2.3 薄肉小径管溶接部の欠陥寸法評価法

建設機械に用いられる油圧配管は、一般に薄肉小径管(直径約10~50mm, 肉厚約2~7mm)である。薄肉小径管の溶接部に対して通常の超音波探傷を適用すると、エコーの経路が複雑となりエコーの識別が困難となる。そのため、定量評価はおろか欠陥検出も不可能となることが多い。

今回、広帯域周波数特性をもった高分解能斜角探触子を開発し、欠陥高さとのエコー高さが、図6に示すような相関関係のあることを利用して、エコー高さから欠陥高さを求める方法を見いだした³⁾。この方法によれば、欠陥高さが20 μ m程度

のものでも評価が可能であり、測定精度は疲労き裂を含めおおむね $\pm 20\%$ である。また、高分解能探触子を使用しているために、欠陥エコーとその他のエコーが完全に分離できるので、エコー識別が容易となり探傷性ははるかに向上した。

現在、日立建機株式会社では本法を建設機械の各種油圧配管溶接部の製作段階での品質管理手段として、また稼働機での配管溶接部の予防保全手段として活用を図り効果を上げている。

3 超音波利用による接触面圧測定法

図7に測定原理を示す。被検体(A)の外表面に超音波探触子を当て、被測定接触面に向けて超音波を入射させる。接触面に超音波がさしかかると、超音波の一部は P_1 の音圧で反射され探触子に戻る。残りの超音波は被検体(B)に伝搬し底面で反射されたのち再び被検体(A)に戻り P_2 の音圧で受信される。デシベルで表示した P_1 と P_2 の音圧の差 ΔP は、図8に示すように接触面圧 σ の対数値と直線関係にあることが判明した。したがって、 ΔP から接触面圧を測定することができる。

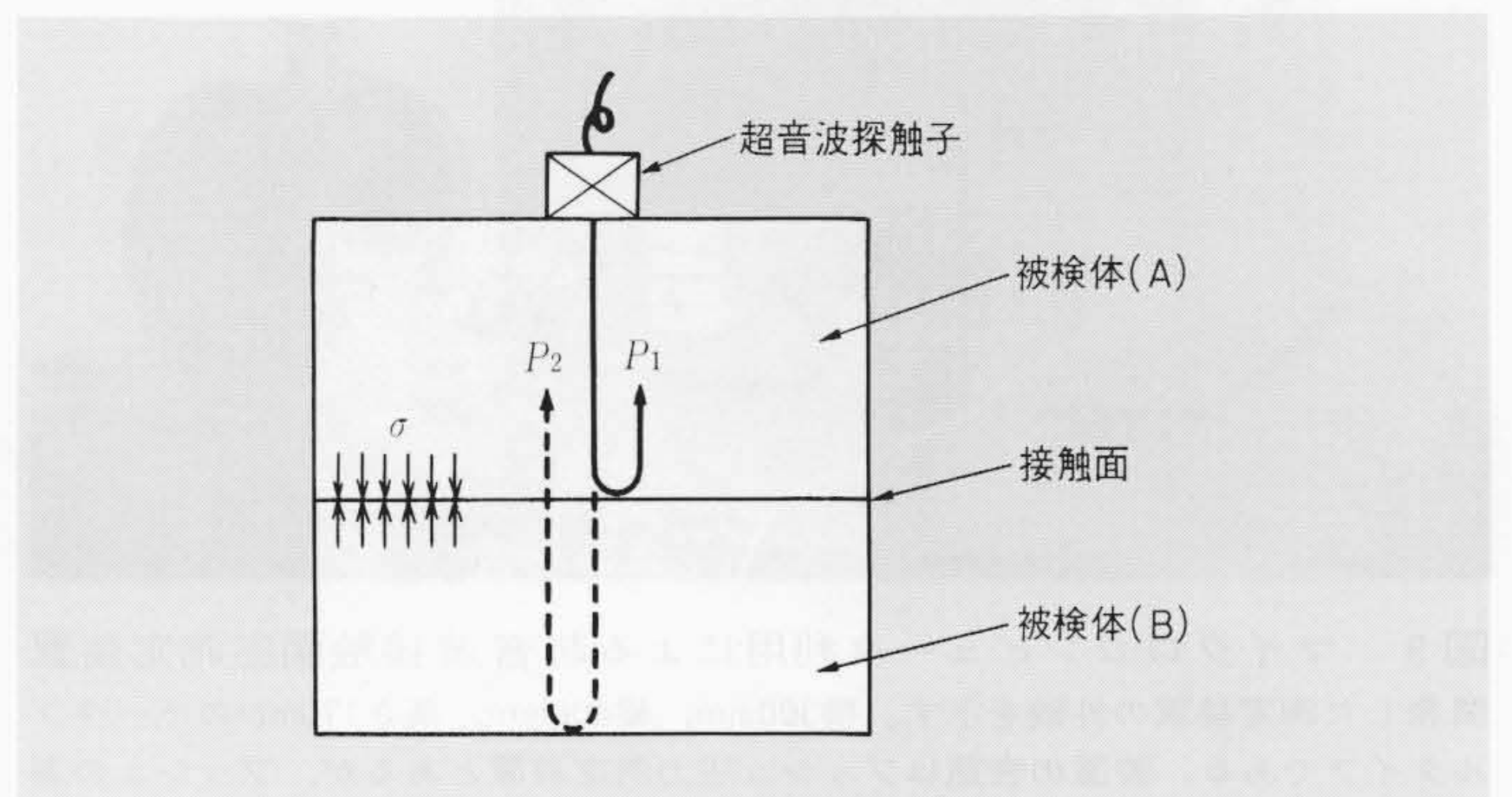


図7 超音波利用による接触面圧測定法の原理 接触面での超音波の反射音圧と透過音圧の差が接触面圧と相関関係にあることを利用して、接触面圧を測定する方法である。

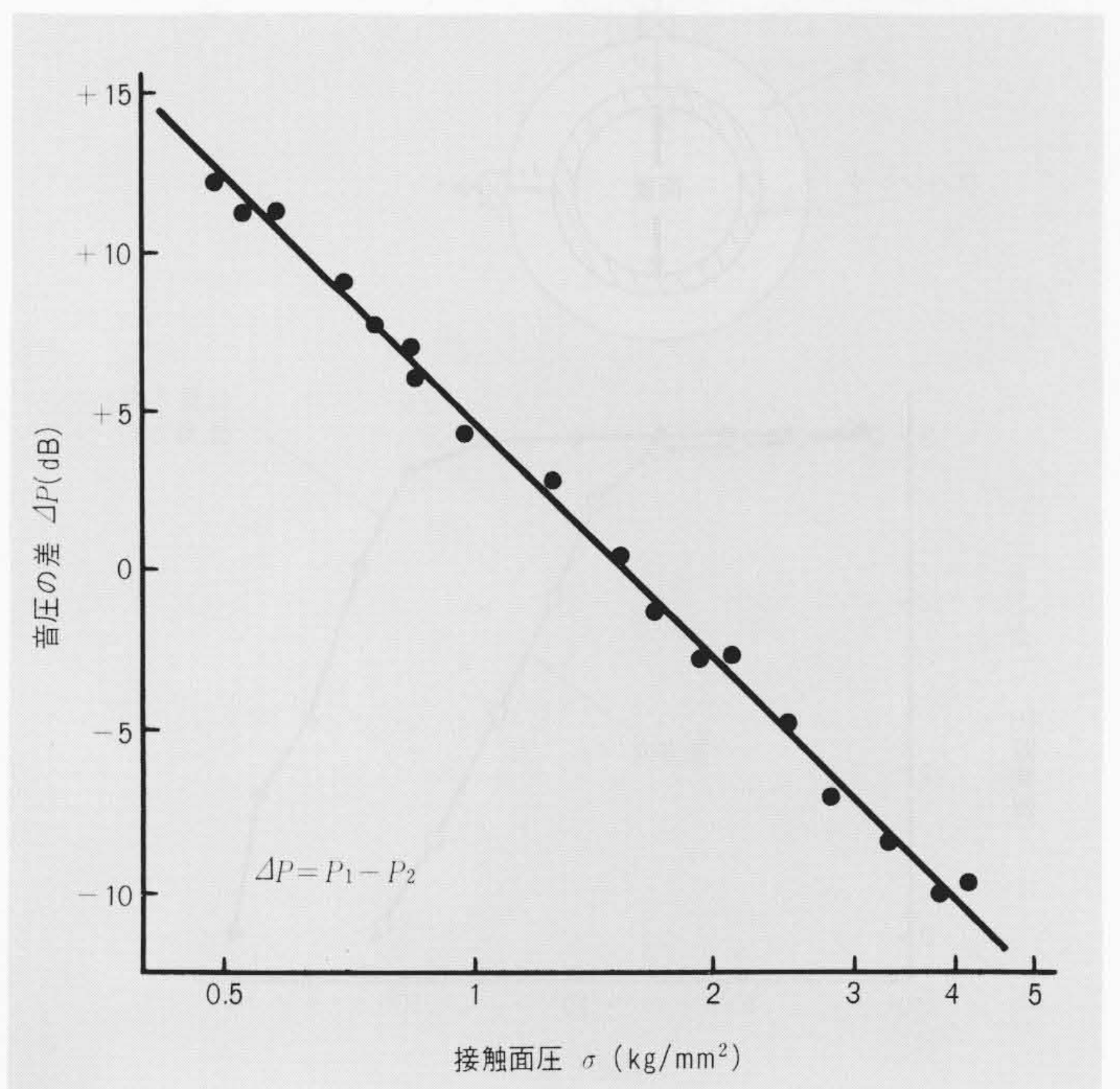


図8 接触面圧と反射・透過音圧差の関係 周波数5MHzの広帯域周波数特性をもつ探触子を用いて行なった実験結果を示す。接触面が平面の場合で、面粗さは約5 μ mである。

接触面が曲率をもつ場合にも、 ΔP と接触面圧 σ には、接触部の曲率半径をパラメータにして図8と同様な関係が得られるので、 ΔP から接触面圧の測定が可能である。

本測定法は、反射波と透過波の音圧の差を評価指標とすることから、探触子設置面の形状や粗さ、探触子の当て方などによって測定精度が直接影響を受けないという特長をもつ。測定精度はおおむね $\pm 10\%$ である。

現在、日立建機株式会社では図9に示すようなマイクロコンピュータ利用による、本測定原理に基づいた専用装置を開発し、実用化を図っている。この装置は、被検体の寸法(厚さ又は外径)及び材質をインプットし、探触子を当てれば探触子設置面直下の面圧が計算され、リアルタイムでデジタル表示されるシステムである。

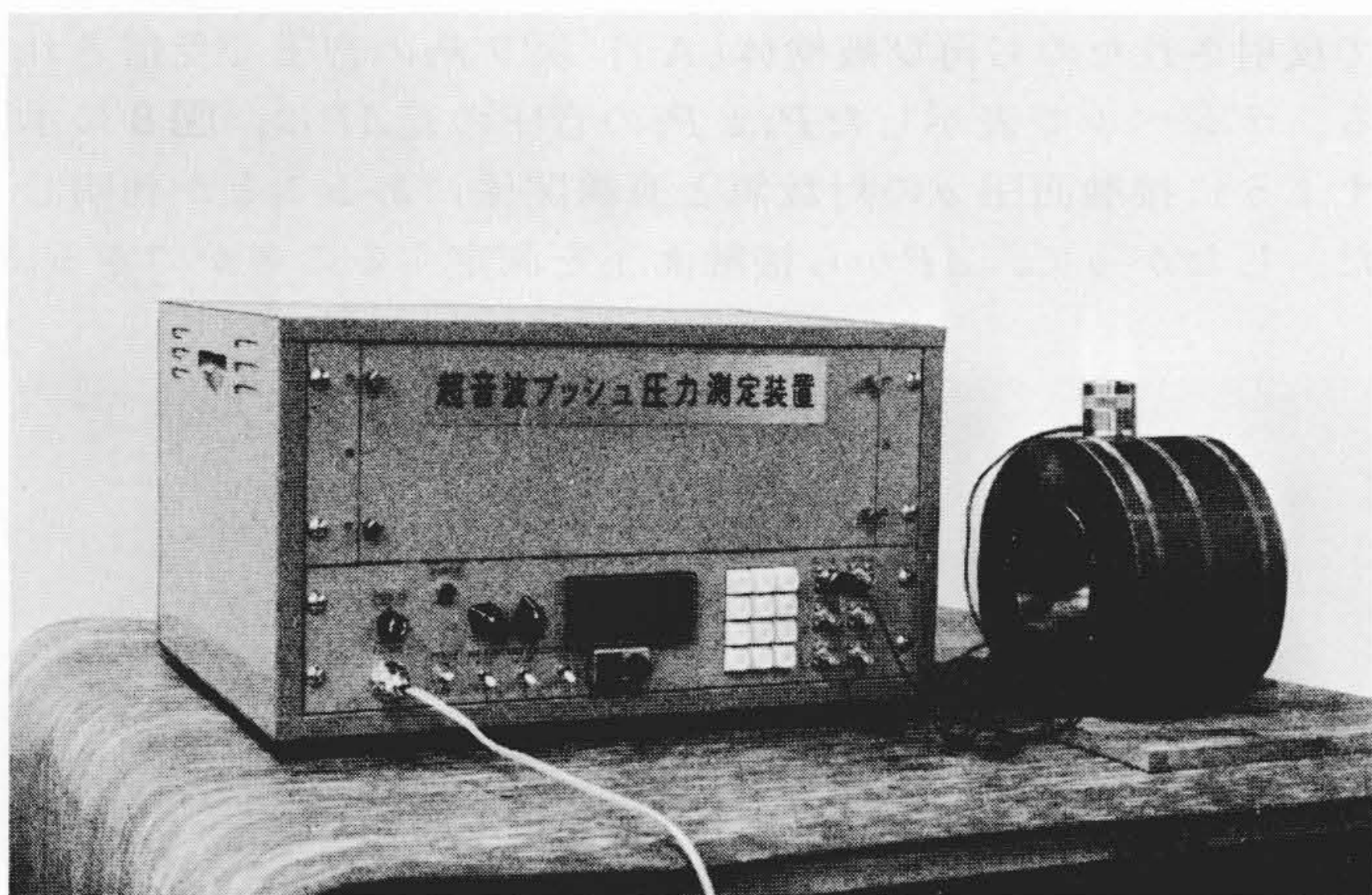


図9 マイクロコンピュータ利用による超音波接触面圧測定装置
開発した測定装置の外観を示す。横300mm、縦400mm、高さ170mmのポータブルタイプである。装置の表題はブッシュ圧力測定装置とあるが、ブッシュの測定に限られるものでなく汎用性がある。

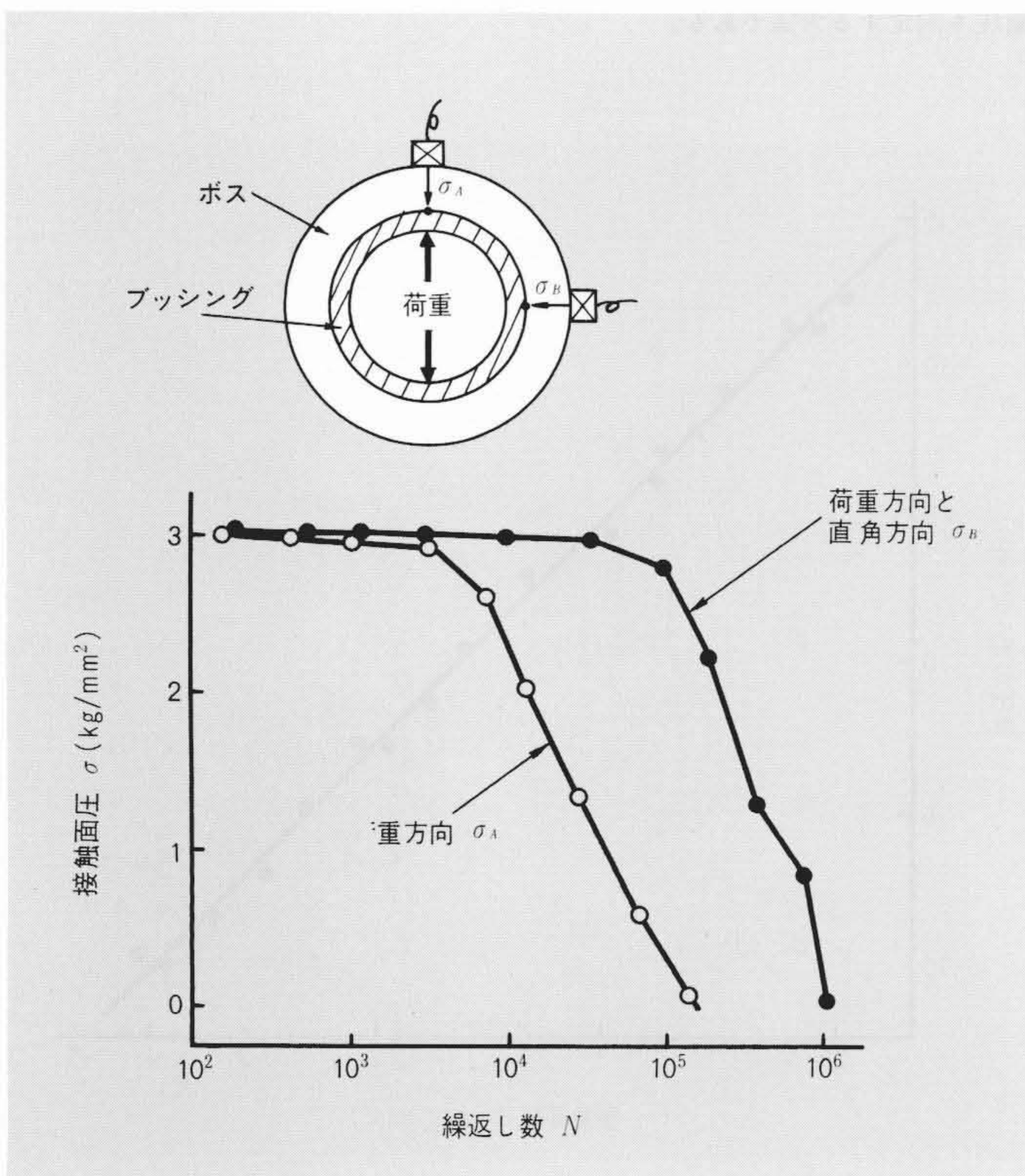


図10 接触面圧の測定例 ボスとブッシングの接触面での荷重の繰返し数に伴う面圧変化を示す実験例である。

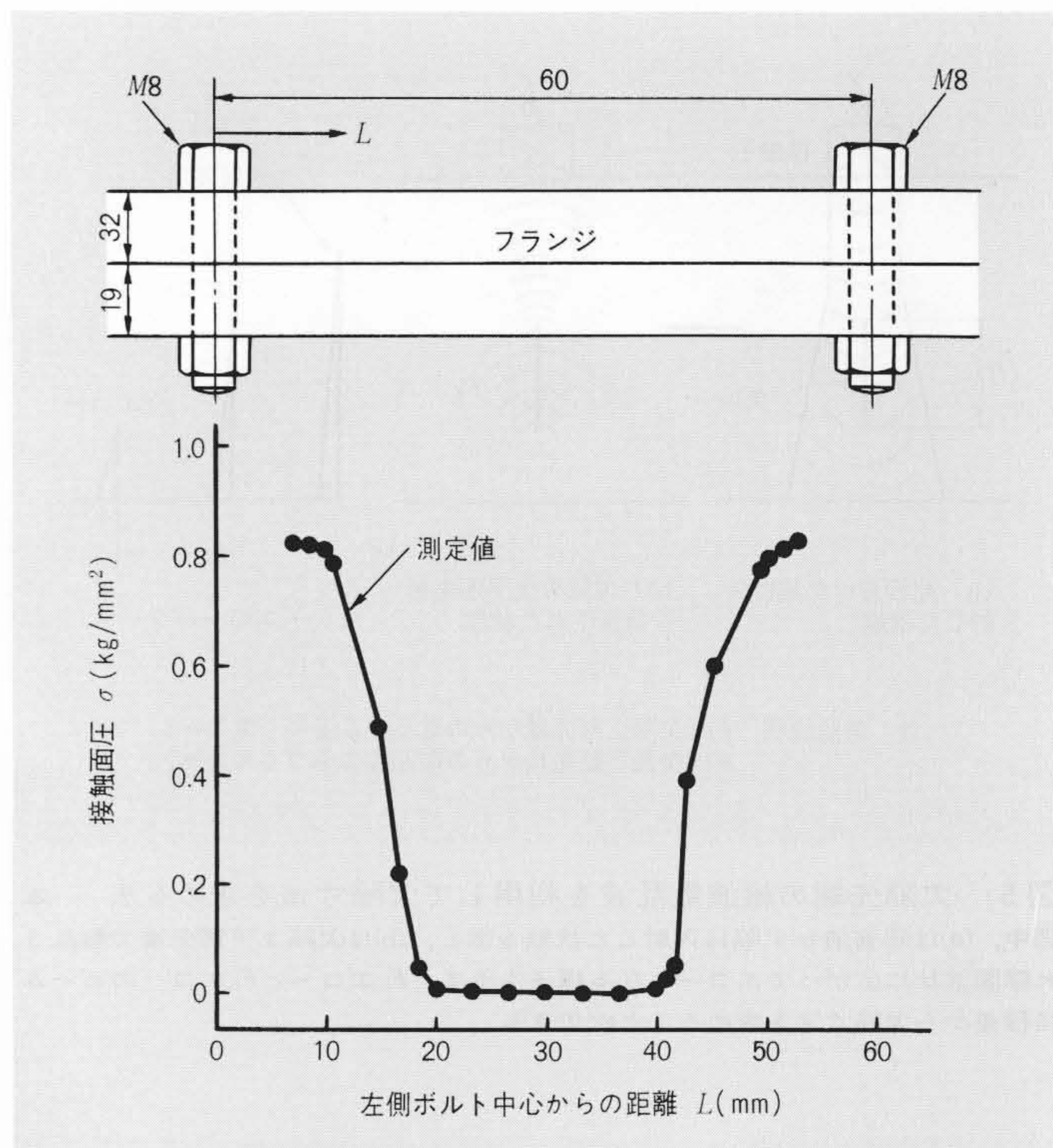


図11 ボルト締結面での面圧分布の測定例 ボルトの締付力が600kgfのときのフランジ面での面圧分布の測定例である。フランジ接触面の面粗さは約 $5\mu\text{m}$ である。

図10は本測定法の適用の一例を示すもので、ボスにブッシングされた状態で、上下方向にピンにより荷重を作用させたときの荷重方向及びそれと直角方向での荷重繰返し数に伴うボス～ブッシング間の面圧の変化パターンを示した例である。面圧の変化状況が一目で明確に分かるであろう。

図11は、本法をボルト締結面での面圧分布の測定として適用した例である。本法を用いれば、同図に示すように面圧分布状態を精度良くマクロ的に把握することが可能である。

日立建機株式会社では、本技術を建設機械用ローラやボス類でのブッシングの面圧測定、ボルト締結部の面圧測定などに適用し、部品製作時の品質管理及び試験時の信頼性確認手段として、また稼働機の予防保全手段として活用を図り、機械の稼働率向上に役立てている。

4 結 言

以上、日立建機株式会社で開発した超音波利用による欠陥寸法高精度測定法及び接触面圧測定法について、それらの原理、測定精度、特徴及び適用例などについて述べた。現在、これらの手法を建設機械部品の品質管理及び予防保全手段として適用し、品質、信頼性及び安全性の向上を図り機械の稼働率向上に寄与させている。

今後、データを蓄積するとともに欠陥寸法測定法の自動化を推進し、いっそうの高精度化を図っていく考えである。

参考文献

- 1) 小倉：モード変換表面波を利用した内部欠陥寸法測定法、非破壊検査、28, 3, 182～190(昭54-3)
- 2) 小倉、外：欠陥上下部先端の縦波散乱波を利用した欠陥高さ測定法、非破壊検査、30, 9, 686～687(昭56-9)
- 3) 小倉：溶接構造物の保守検査について、日本非破壊検査協会004(保守検査)特別研究委員会資料、004, 197, 34～40(昭55-8)