

Q-30

超音波探傷の原理を教えてください

A-30

一般的に超音波と呼ばれるものは、人間の耳で聞くことの出来る周波数より高い周波数を指します。個人差はありますが、人間の耳で聞くことの出来る周波数は20 Hz～20 kHz程度でこれを可聴周波、それより高い周波数を超音波と呼んでいます。音波は物質の振動により伝播するもので、例えば、真空中では振動する物質がないため音波は伝播しません。また、気体・液体・固体それぞれの状態では伝播する音波も異なり、気体・液体の状態では縦波のみが伝播し、固体の状態では縦波に加え横波・表面波等も伝播し、対象物の条件によっては板波やクリーピング波も伝播します。超音波探傷とはこれら音波の反射を利用して、物を壊さずに物質内部の検査を行う方法です。

【超音波の性質】

音波は光に比べ非常に速度が遅く、且つ伝播する対象物の状態によっても音波の速度（音速）は変化します。一般的に音速は以下の式で与えられます。

$$\text{音速 } C = (\text{弾性定数} / \text{密度})^{1/2}$$

上記の式から超音波探傷の対象として一般的な鋼は縦波音速5900 m/s、横波音速が3230 m/sとなります。また、任意の周波数1波長の間隔は以下の式で与えられます。

$$\text{波長 } \lambda = \text{音速 } C / \text{周波数 } f$$

上記の式から波長と周波数の関係は反比例の関係にあり、周波数が高くなれば逆に波長は短くなることが分ります。きずとして検出するためには、超音波が反射される反射源の寸法は波長の1/10程度で、欠陥の寸法を測定するためには、音圧から理論的な反射源の寸法は波長の1/2程度といわれています。このことから物質内部の小さなきずを検出するには高い周波数が必要となるわけです。しかしながら実際は、あまり高い周波数を用いると波長が短くなりすぎ、物質内の結晶粒によって散乱減衰を生じるため物質内部まで超音波が伝わらなくなるので、一般的な超音波探傷では1 MHz～10 MHzがよく用いられています。

【超音波の発生原理】

超音波の発生には、インパルス電圧を掛けると伸縮・膨張して振動（逆圧電現象）する圧電素子と呼ばれるものを使用しています。圧電素子の伸縮・膨張により物理的に発振した超音波は物質内を伝播し、伝播経路に伝播を遮るもの、つまりきずがあった場合はきずで反射し、発振した音の一部が圧電素子に戻ってきます。圧電素子に力が加わる

と加えた力に応じた電圧が生じ（圧電現象）、その電圧を信号として出力して信号を見ながら物質内部のきず有無の検査を行います。この圧電素子の伸縮・膨張・電圧への変換をまとめて圧電効果と呼んでいます。また、圧電素子の種類として一般的に水晶やジルコンチタン酸鉛等が挙げられ、最近ではエネルギーの変換効率の良いコンポジット材が使用されています。

超音波を使用した検査方法として、垂直探傷と斜角探傷の2通りに大きく分類出来ますので、以下にそれを記します。

【超音波探傷（垂直探傷）】

ここでは例として Fig. 1 のように、20 mm 厚みの鋼材中心部にきずがある検体を縦波で垂直検査した場合を考えます。きずのない部位に探触子 A を、きずのある部位に探触子 B を置いて超音波を発振させた場合、内部にきずがある場合とない場合ではそれぞれ超音波の往復伝播時間が異なります。ここで超音波の伝播時間は以下の式で与えられます。

$$\text{往復伝播時間} = \text{往復伝播距離} / \text{材料縦波音速} \cdots \text{①}$$

上記の式から、鋼の縦波音速を5900 mm/sec とすると、探触子 A から発振した超音波の往復伝播時間は以下となります。

$$T_A = 40(\text{mm}) / 5900 \times 10^3(\text{mm}) = 6.78(\text{nsec})$$

同様に探触子 B の場合は以下となります。

$$T_B = 20 / 5900 \times 10^3(\text{mm}) = 3.39(\text{nsec})$$

横軸に伝播時間・縦軸にエコー高さ（反射信号強度）を表したグラフに上記結果を表示すると、それぞれ Fig. 2 となります。

実際の検査では、伝播時間ではなくきずの介在する深さを知る必要がありますので、一般的な探傷器では伝播時間を深さに換算して深さ表示を行っています。

$$\text{例} : 6.78(\text{nsec}) \times 5900 \times 10^3(\text{mm/sec}) / 2 = 20(\text{mm})$$

【超音波探傷（斜角探傷）】

斜角探傷にも縦波を使用するものと横波を使用するものに分類されますが、ここでは横波を使用した斜角探傷についての説明を行います。

ある厚みをもった鋼材を、検体内屈折角70度の横波斜角探触子で検査を行った場合、深さ10 mm に介在するきずから超音波が反射した場合は Fig. 3 のイメージとなります。

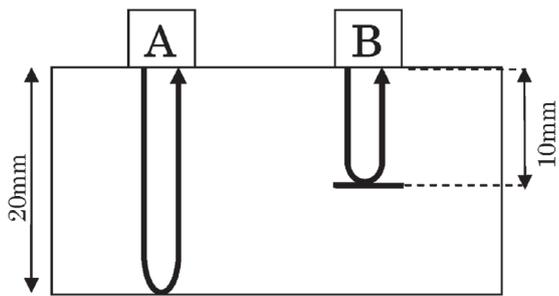


Fig. 1 超音波を使用した鋼材検査

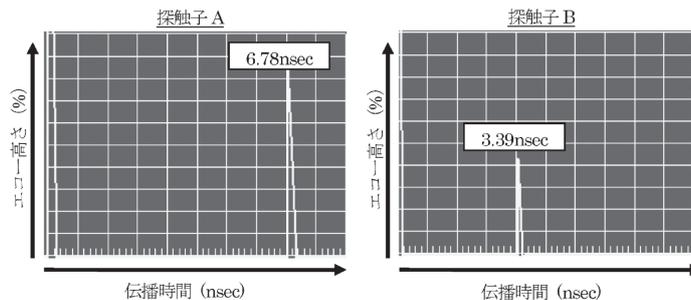


Fig. 2 探触子 A・B の伝播時間

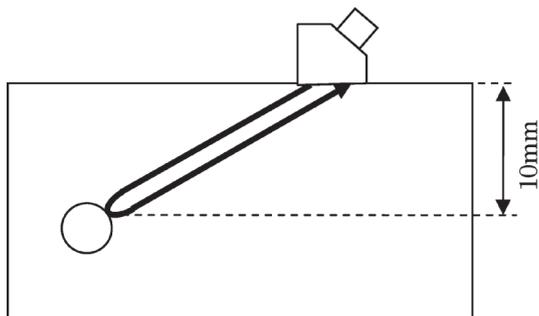


Fig. 3 斜角を使用した鋼材検査

<ul style="list-style-type: none"> 小型軽量0.96kg 防塵・防水 (IP67 準拠) 高解像度ディスプレイ SD カード使用可能 	<ul style="list-style-type: none"> 超音波検査の標準モデル 防塵・防水 (IP67 適合) ダイレクトアクセスキー採用 USB メモリ使用可能 	<ul style="list-style-type: none"> 最高性能探傷器 防塵・防滴 (IP66 適合) 高解像度大型ディスプレイ USB メモリ・CF カード使用可能 	<ul style="list-style-type: none"> 全 A-scope 保存 最大 2 軸エンコーダ入力可能 C-scan 画像描写 TOFD オプション

Fig. 4 様々な超音波探傷器

ここで、屈折角度70度で深さ10mmの反射源からの伝播距離は、三角関数から以下の式で与えられます。

$$\begin{aligned} \text{往復伝播距離 (mm)} &= 2 \times (10 \text{ (mm)} / \cos 70 \text{ (deg)}) \\ &= 58.48 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

前述の①式から鋼の横波音速を3230 m/sec とすると、往復伝播時間は以下となります。

$$T_c = 58.48 \text{ (mm)} / 3230 \times 10^3 \text{ (mm)} = 18.1 \text{ (nsec)}$$

実際の検査では垂直探傷と同様、伝播時間ではなくきずの介在する深さを知る必要があります。例えば上記の例では下記の計算により伝播時間から深さを算出することが出来ますが、最近のデジタル探傷器では自動的に伝播時間を深さに換算して表示を行っています。

$$\begin{aligned} \text{例：} & 18.1 \text{ (nsec)} \times 3230 \times 10^3 \text{ (mm/sec)} / 2 = 26.77 \\ & \text{(mm)} \\ & \cos 70 \times 26.77 = 10 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

これらの信号を読み取りながら、物質内部の状態を推測し検査を行うことを超音波探傷と呼んでいます。

【その他の超音波探傷】

前項で述べた超音波探傷の他に、近年様々な超音波探傷の手法が利用されており、代表的な技術として TOFD 検査 (Time Of Flight Diffraction)、PA 検査 (Phased Array) が挙げられます。前者の TOFD 検査は Fig. 5 のように超音波がきずに当たると、反射だけではなくきず始端と終端から回折波が発生する原理を利用したもので、精度良いきず高さのサイジング・検査部位データの全収録・検査スピードの速さという利点が挙げられ、現在圧力容器等の溶接部位に対して広く適用が進んでいます。また、後者の PA 検査は、Fig. 6 のように複数の信号を画像処理し画像化

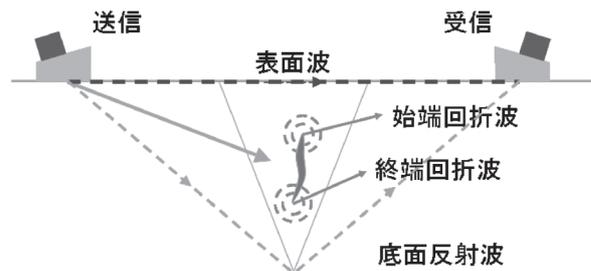


Fig. 5 TOFD の基本原理

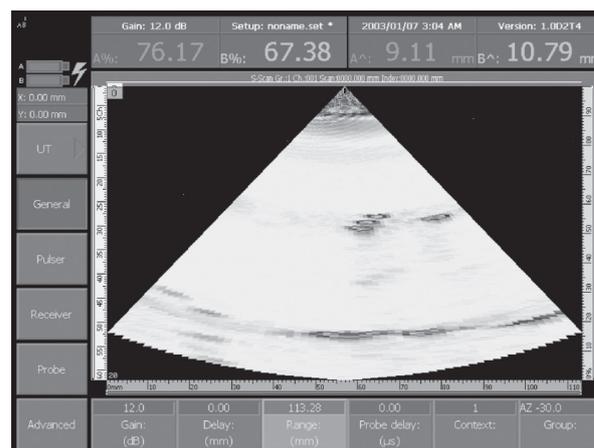


Fig. 6 PA 検査の一例

して検査を行う方法で、技術としては以前からある医療用の胎児エコーを想像すると理解が早いと思います。信号のみの判断ではなく画像として内部状況の判断ができ、一度に広い範囲を検査できることから、こちらも近年幅広く適用が進んでいます。