

JIS 意見受付

JIS Z 2353 超音波による固体の音速の測定方法
原案作成委員会

この JIS は日本非破壊検査協会規則「JIS 原案作成に関する規則」に基づき関係者に JIS の制定前の意見提出期間を設けるために掲載するものです。

意見は規格原案決定の際の参考として取り扱いさせていただきます。

掲載されている JIS についての意見提出は下記メールアドレスまでお願いいたします。

意見受付締切日：2020 年 1 月 8 日（水）

意見提出先：Email： bsn@jsndi.or.jp

目 次

	ページ
序文	1
1 適用範囲	1
2 引用規格	1
3 用語及び定義	1
4 記号	2
5 技術者	4
6 測定精度	4
7 測定に必要な事項	4
7.1 試験体	4
7.2 計測装置	5
7.3 基本となる計測系の構成及び探傷図形	6
7.4 波の検出方式の選定	8
7.5 ゼロ点調整用試験片	9
7.6 伝搬時間の測定方法	9
7.7 超音波探触子	9
7.8 接触媒質	9
8 音速測定の共通事項	10
8.1 試験体の機械的厚さ測定	10
8.2 エコー及び透過波の検出	10
8.3 温度管理	10
8.4 再現性の確認	10
8.5 測定位置	10
9 高精度の音速測定	10
9.1 音速測定方法の種類	10
9.2 パルサーレーバシステムなどによる方法	11
9.3 シングアラウンド法による方法（附属書 B 参照）	11
9.4 電磁超音波共鳴法による方法（附属書 C 参照）	12
10 普通精度の音速測定	12
10.1 伝搬時間測定方法の種類及び波の検出方法の種類	12
10.2 パルサーレーバシステム又はデジタル探傷器を用いる場合	12
10.3 超音波厚さ計又は音速計を用いる場合	17
10.4 温度変化の影響の確認	18
11 測定結果の表示方法	18
附属書 A（規定）伝搬時間の測定方法	19
附属書 B（規定）シングアラウンド法による音速測定	23

Z 2353 : 0000

附属書 C (規定) 電磁超音波共鳴法による横波音速の測定	25
附属書 D (参考) パルスオーバーラップ法についての注意及び適用例	28

Pubcome 2020/01/08迄

まえがき

この規格は、産業標準化法第 16 条において準用する第 12 条第 1 項の規定に基づき、一般社団法人日本非破壊検査協会（JSNDI）及び一般社団法人日本規格協会（JSA）から、産業標準原案を添えて日本産業規格を改正すべきとの申出があり、日本産業標準調査会の審議を経て、経済産業大臣が改正した日本産業規格である。

これによって、**JIS Z 2353:2003** は改正され、この規格に置き換えられた。

この規格は、著作権法で保護対象となっている著作物である。

この規格の一部が、特許権、出願公開後の特許出願又は実用新案権に抵触する可能性があることに注意を喚起する。経済産業大臣及び日本産業標準調査会は、このような特許権、出願公開後の特許出願及び実用新案権に関わる確認について、責任はもたない。

超音波による固体の音速の測定方法

Method for measurement of ultrasonic velocity in solids

序文

この規格は、1991年に制定され、その後2回の改正を経て今日に至っている。前回の改正は2003年に行われたが、その後の技術の動向及び測定機器の進歩に対応するため、改正した。

なお、対応国際規格は現時点で制定されていない。

1 適用範囲

この規格は、周波数1 MHz以上の超音波法によって、固体の音速を測定する方法及び測定結果を表示する方法について規定する。

2 引用規格

次に掲げる規格は、この規格に引用されることによって、この規格の規定の一部を構成する。これらの引用規格は、その最新版（追補を含む。）を適用する。

- JIS Z 2300** 非破壊試験用語
JIS Z 2350 超音波探触子の性能測定方法
JIS Z 2352 超音波探傷装置の性能測定方法
JIS Z 2355-1 非破壊試験—超音波厚さ測定—第1部：測定方法
JIS Z 2355-2 非破壊試験—超音波厚さ測定—第2部：厚さ計の性能測定方法

3 用語及び定義

この規格で用いる主な用語及び定義は、次によるほか、**JIS Z 2300**、**JIS Z 2355-1** 及び **JIS Z 2355-2** による。

3.1

ゼロ点調整用試験片

伝搬時間を測定する基準点（伝搬時間ゼロであるので、以下、ゼロ点という。）を求めるために使用する平板試験片。

3.2

伝搬時間

超音波がある点から別の点へ伝搬するのに要する時間。

3.3

音速計

超音波厚さ計と同じ原理によって固体の音速を測定し、デジタル表示する計測器。

3.4

パルサーレーシーバシステム

パルサーレーシーバ（超音波送受信器）、AD変換系機器（デジタルオシロスコープ、AD変換ボードなど）及び記録装置（パソコンなど）を組合せた装置（**図1**参照）。

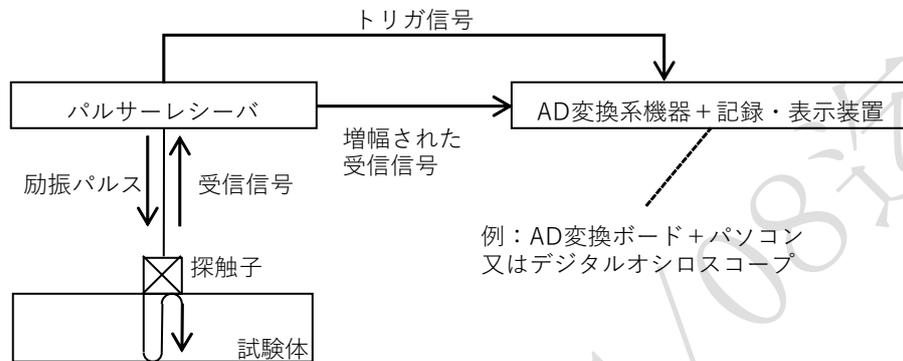


図1—パルサーレーシーバシステム

3.5

検波

高周波交流信号を直流信号に変換する電気的な処理。交流信号の正側だけを取り出して変換するプラス検波，交流信号の負側だけを取り出して変換するマイナス検波，交流信号の絶対値を取り出して変換する全波検波がある。

3.6

シングアラウンド測定装置

超音波の試験体内伝搬時間と，電気的な遅延時間の合計時間を一つの動作周期として動作し，多数の繰り返し動作の積算時間から一つの動作の時間を測定することによって，超音波伝搬時間を高精度で測定する装置。

3.7

バースト波

正弦波状の波が10サイクル程度～数10サイクル程度連なった形状をした波。

3.8

電磁超音波共鳴装置

電磁超音波探触子を用いて，金属などの導電性材料板の厚さ方向にバースト波超音波を発生させ，超音波の周波数を掃引することによって周波数スペクトルを取得する装置。圧電素子の圧電効果によって励起した振動を試験体へ伝達させる探触子とは異なり，この装置は非接触で超音波を送受信できるため，測定精度への影響因子が少なく，高精度測定に適している。

4 記号

この規格における記号は**表1**による。

表 1 - 記号と内容との対照表

記号	内容
λ	試験体での超音波波長
λ_D	遅延体での超音波波長
t_s	試験体の板厚
t_D	遅延体の厚さ
D	振動子直径又は振動子幅
MB	送信パルス
B_i	第 i 回底面エコー (底面で i 回反射したエコー)
S_i	表面で i 回反射した表面エコー
U	透過波
R	ゼロ点
V	音速
V_s	横波音速
V_L	縦波音速
V_{s1}	異方性がある場合の二つの独立な横波のうち大きい方の横波音速
V_{s2}	異方性がある場合の二つの独立な横波のうち小さい方の横波音速
V_w	水中の音速
V'	音速設定値
Z_1	遅延材の音響インピーダンス
Z_2	試験体の音響インピーダンス
Z_3	空気の音響インピーダンス
n	基準化距離
T_{MS}	MB と S_1 との時間差
ΔT_{01}	超音波が試験体を 1 往復するのに要する時間
i	試験体底面での超音波反射回数
j	試験体底面での超音波反射回数 ($j > i$)
B_i	試験体底面で i 回反射した底面エコー
B_j	試験体底面で j 回反射した底面エコー
T_{Si}	底面エコー B_i について、起点から測定した伝搬時間
T_{Sj}	底面エコー B_j について、起点から測定した伝搬時間
ΔT_{ij}	底面エコー B_i と B_j との伝搬時間差
T_{Ci}	底面エコー B_i の伝搬時間をループに組み込んで測定した送信周期 (シングアラウンド法)
T_{Cj}	底面エコー B_j の伝搬時間をループに組み込んで測定した送信周期 (シングアラウンド法)
L_{Si}	底面エコー B_i のビーム路程 (起点は表面エコーではない)
L_{Sj}	底面エコー B_j のビーム路程 (起点は表面エコーではない)
T_{FS}	表面エコーについて、起点から測定した伝搬時間
ΔT_{FB}	表面エコーと第 1 回底面エコーとの伝搬時間差
L_{FS}	表面エコーのビーム路程 (起点は表面エコーではない)
ΔL_{FB}	表面エコーを起点とした第 1 回底面エコービーム路程
B_{R1}	ゼロ点調整用試験片の第 1 回底面エコー
T_{R1}	ゼロ点調整用試験片の第 1 回底面エコー B_{R1} について、起点から測定した伝搬時間
B_{R2}	ゼロ点調整用試験片の第 2 回底面エコー
T_{R2}	ゼロ点調整用試験片の第 2 回底面エコー B_{R2} について、起点から測定した伝搬時間
T_{BS}	試験体の第 1 回底面エコー B_1 について起点から測定した伝搬時間
L_{R1}	ゼロ点調整用試験片の第 1 回底面エコー B_{R1} のビーム路程
L_{R2}	ゼロ点調整用試験片の第 2 回底面エコー B_{R2} のビーム路程
L_{BS}	試験体の第 1 回底面エコー B_1 のビーム路程
T_{RX1}	ゼロ点調整用試験片の透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間
T_{RX2}	ゼロ点調整用試験片内部でさらに 1 往復した透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間
T_{SX}	試験体透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間
L_{RX1}	ゼロ点調整用試験片の透過パルスのビーム路程
L_{RX2}	ゼロ点調整用試験片内部でさらに 1 往復した透過パルスのビーム路程
L_{SX}	試験体の透過パルスのビーム路程
T_{ISX}	水浸法において、試験体があるときの透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間

表 1 — 記号と内容との対照表 (続き)

記号	内容
T_{IX}	水浸法において、試験体がないときの透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間
Δt_w	水浸法測定における探触子間隔の変更量
T_{IX1}	水距離変更前の透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間 (試験体なし)
T_{IX2}	水距離変更後の透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間 (試験体なし)
L_{ISX}	水浸法において、試験体があるときの透過パルスのビーム路程
L_{IX}	水浸法において、試験体がないときの透過パルスのビーム路程
L_{IX1}	水距離変更前の透過パルスのビーム路程
L_{IX2}	水距離変更後の透過パルスのビーム路程
f_1	隣接するピークの低い方の周波数
f_2	隣接するピークの高い方の周波数
r	$\left(\frac{f_2}{f_2 - f_1}\right)$ を四捨五入した整数 (次数)
f_i	共鳴ピーク (i は共鳴次数)
f_{Pi}	異方性がある場合の大きい速度に対応した共鳴ピーク (i は共鳴次数)
f_{Hi}	異方性がある場合の小さい速度に対応した共鳴ピーク (i は共鳴次数)
B_{1D}	遅延体がある場合の試験体第 1 回底面エコー
B_{2D}	遅延体がある場合の試験体第 2 回底面エコー
n_1	遅延体がない場合の試験体第 1 回底面エコーの基準化距離
n_2	遅延体がない場合の試験体第 2 回底面エコーの基準化距離
n_{1D}	遅延体がある場合の試験体第 1 回底面エコーの基準化距離
n_{2D}	遅延体がある場合の試験体第 2 回底面エコーの基準化距離
T_{RH}	ゼロ点調整試験片の片道の超音波伝搬時間
T_{E0}	パルスエコー法でのゼロ点
T_{X0}	透過法でのゼロ点
T_{P1}	パルスオーバーラップ法において、第 1 の波の表示のために設定した遅延時間
T_{P2}	パルスオーバーラップ法において、第 2 の波の表示のために設定した遅延時間

5 技術者

超音波の伝搬に関して十分な知識をもち、測定装置の取り扱いに習熟していなければならない。又はそのような技術者の指導の下で、測定を行えるようにする。

6 測定精度

精度 1% を目安とする測定を普通精度の測定として分類し、精度 1% より高い精度を目指す測定を高精度の測定として分類した。

なお、音速測定の精度は試験体の状態に大きく依存するので、高精度の測定方法及び普通精度の測定方法がそれぞれ目安とする測定精度を保証するものではない。

7 測定に必要な事項

7.1 試験体

測定対象は表裏面が平行な平板試験体とし、目標とする精度に応じて、表 2 に従い加工する。

試験体の厚さ t_s が大きいほど、機械的板厚測定の相対誤差を小さくでき、かつ、超音波伝搬時間測定の相対誤差を小さくできるが、厚さ t_s が大きくなりすぎると、超音波の減衰による波形変化を生じ、音速測定の誤差が増大する。この二つの効果を考慮して試験体の厚さ t_s を決める。

表 2—試験体に必要な精度及び寸法

項目	普通精度	高精度
表面及び裏面の粗さ	Ra 6.3μm 程度	Ra 1.6μm 程度
厚さの測定精度	0.05 mm 以内	0.005 mm 以内
厚さ	—	10 mm 以上
振動子中心と端面との距離	$\lambda \cdot t_s / D$ 又は D のいずれか大きい値以上 ただし、 λ : 波長, t_s : 板厚, D : 振動子直径又は振動子幅	

7.2 計測装置

7.2.1 種類

音速測定は、パルス反射法を利用した計測器と探触子とを組合せたシステムを用いるのが一般的である。この規格では、次のいずれかの装置を使用する。

- a) **パルサーレーザシステム** 3.4 参照。波形の観測、記録及び伝搬時間計測は、デジタルオシロスコープを用いたシステムが適している。波形表示をもたない AD 変換系機器を用いる場合には、パソコンと組合せて、波形の観測、記録及び伝搬時間計測を行う。
- b) **デジタル探傷器** JIS Z 2352 に定義されたデジタル探傷器。ビーム路程などのエコー情報をデジタル処理し、表示する機能をもつ。
なお、この規格でいうビーム路程は、デジタル探傷器をパルスエコー法又は 2 探触子法に設定したときに表示されるビーム路程である。
- c) **超音波厚さ計** JIS Z 2355-1 に定義された超音波厚さ計。厚さ計測結果をデジタル表示する。
- d) **音速計** 3.3 参照。
- e) **シングアラウンド測定装置** 9.3 参照。
- f) **電磁超音波共鳴装置** 9.4 参照。

7.2.2 必要な性能

測定精度を確保するため、使用する機器は表 3-1 及び表 3-2 に規定する要求事項を満たす必要があり、時間軸、周波数測定機能などが校正されていなければならない。

表 3-1—使用機器に必要な性能（普通精度測定）

使用機器	必要性能
パルサーレーザシステム	時間分解能 $\leq 10\text{ns}$
デジタル探傷器	距離分解能 $\leq 0.1\text{ mm}$
超音波厚さ計	厚さ分解能 $\leq 0.1\text{ mm}$
音速計	測定値のばらつき $\leq 1\%$

表 3-2—使用機器に必要な性能（高精度測定）

使用機器	必要性能
パルサーレーザシステム	時間分解能 $\leq 2.5\text{ns}$
デジタル探傷器	時間分解能 $\leq 2.5\text{ns}$
超音波厚さ計	時間分解能 $\leq 2.5\text{ns}$
シングアラウンド測定装置	周期測定分解能 $\leq 2.5\text{ ns}$

	周波数, 振幅が変わったときの遅延時間安定性 $\leq 1 \text{ ns/min}$
電磁超音波共鳴装置	周波数測定分解能 $\leq 0.2 \text{ kHz}$

7.3 基本となる計測系の構成及び探傷図形

- a) **直接接触法を用いるエコーの検出** 接触媒質を介して試験体表面に探触子を密着させると, 図 2 のように底面エコーで複数回反射したエコーを観察できる。

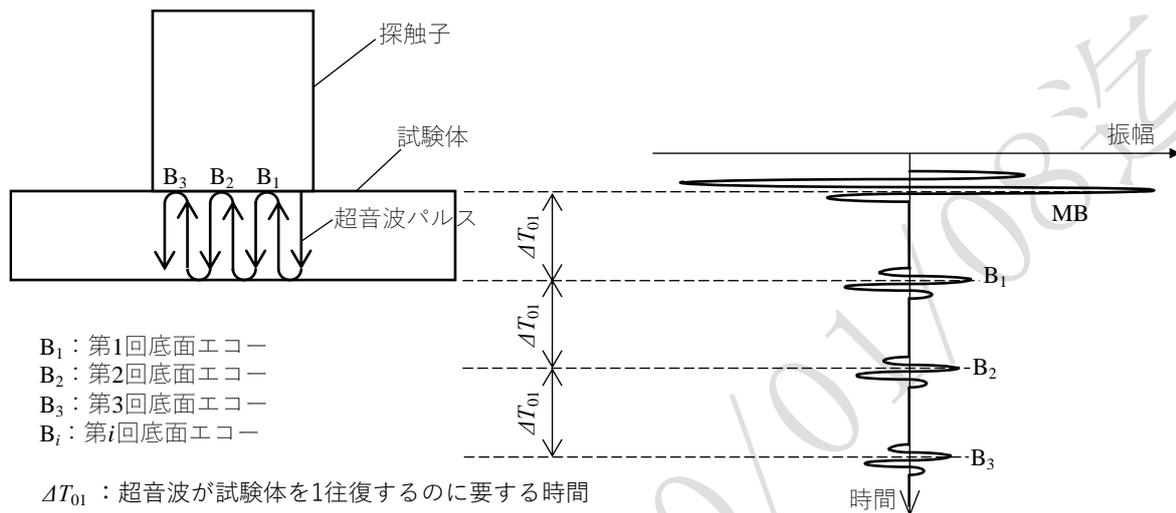
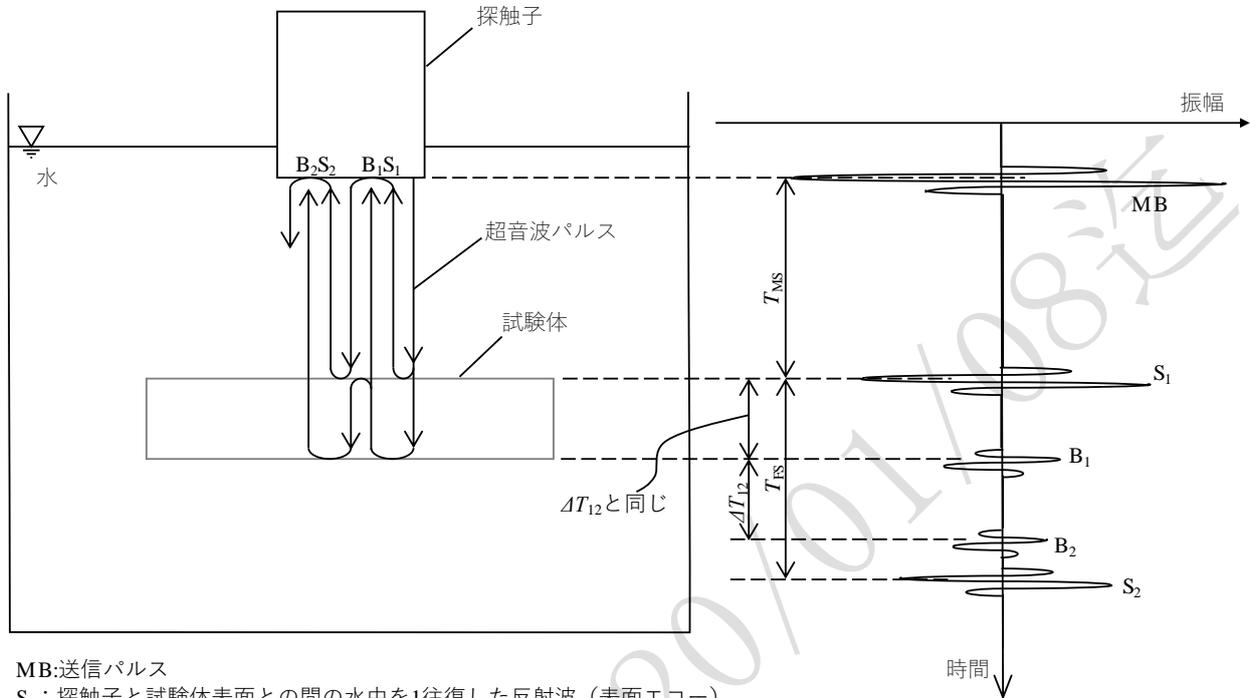


図 2—直接接触法を用いるエコーの検出

c) **水浸法を用いるエコーの検出** 試験体を水中に設置し、探触子からの超音波ビームが試験体表面に垂直に入射するよう調整すると、**図3**のように試験体表面で反射した表面エコー及び試験体に入射し底面で反射したエコーを観察できる。遅延材を用いた直接接触法でも類似した探傷図形が得られる。



MB:送信パルス

S₁: 探触子と試験体表面との間の水中を1往復した反射波 (表面エコー)

S₂: 探触子と試験体表面との間の水中を2往復した反射波 (表面エコー)

T_{MS}: MBとS₁との時間差

ΔT₁₂: B₁とB₂との時間差

図3-水浸法を用いるエコーの検出

c) **二振動子探触子を用いるエコーの検出** **図4**のように、接触媒質を介して試験体表面に二振動子探触子を密着させ、底面エコーを観測する。底面で1回反射したエコーB₁を観察できる。

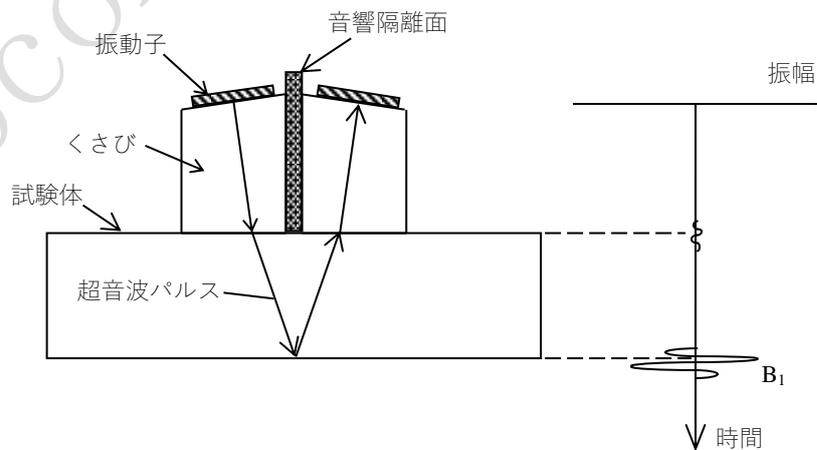


図4-二振動子探触子を用いるエコーの検出

- d) **透過法を用いる透過波の検出** 図5のように、二つの探触子を用いて、片方を送信用、他方を受信用として動作させると、試験体を透過するパルスUを検出できる。水浸法の場合は、探触子と試験体との間に水が介在するが、探傷図形に大きな違いはない。

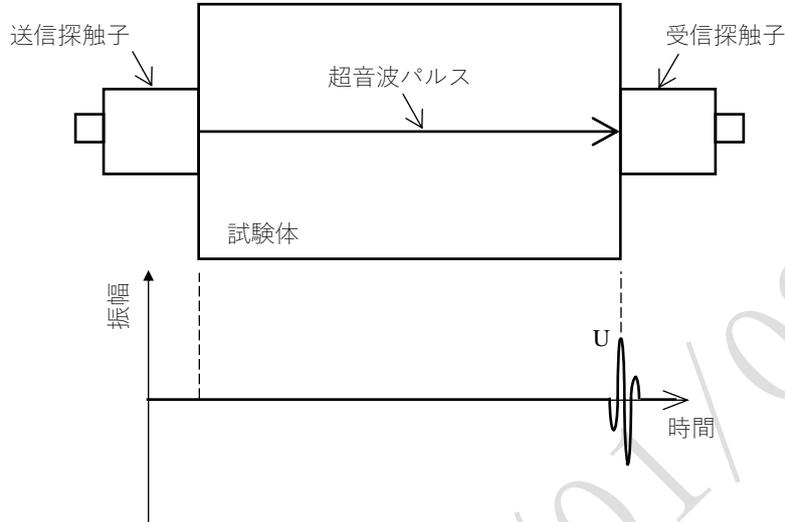


図5—透過法を用いる透過パルスの検出

7.4 波の検出方式の選定

伝搬時間測定に用いる波の検出方式には、表4に挙げた種類がある。目的に応じて適切な方法を選択する。

表4—伝搬時間測定に用いる波の検出方式

波の検出方式	測定内容	探傷図形 (基本表示)	用いるケース
$B_i - B_j$ 方式 ($i=1,2,\dots, j>i$)	底面エコーの二つの多重エコー (B_i, B_j) 間の伝搬時間差		a) 底面エコーの多重エコーが観察できるとき。 b) 底面エコーの多重エコーが観察でき、かつ、高精度測定が必要なとき。
$S - B_1$ 方式	表面エコー (S) と第1回底面エコー (B_1) との伝搬時間差		a) 波の検出方式がこの方式に固定されている機器を用いるとき。 b) B_2 エコーの SN 比が不十分なき。
$R - B_1$ 方式	ゼロ点調整用試験片によるゼロ点 (R) と第1回底面エコー (B_1) との時間差		a) 二振動子探触子を用いるとき。 b) B_2 エコーの SN 比が不十分なき。
$R - U$ 方式	ゼロ点調整用試験片などによるゼロ点 (R) と透過パルス (U) との時間差		a) B_1 エコーの SN 比が不十分なき。
シングア라운드法		9.3 参照	a) 高精度測定が必要なとき。
電磁超音波共鳴法		9.4 参照	a) 高精度測定が必要なとき。

MB : 送信パルス, B_i : 第 i 回底面エコー, S : 表面エコー, U : 透過波, R : ゼロ点

7.5 ゼロ点調整用試験片

表 4 に示す R-B₁ 方式及び R-U 方式の場合には、ゼロ点調整用試験片として、立上がり十分に鋭い安定した波形の B1 エコー及び B2 エコーが得られる平板試験片を用意する。その材質及び寸法は問わない。

7.6 伝搬時間の測定方法

伝搬時間の計測方法として、次の方法がある。

- a) ピークポイント法
- b) スライスレベル法
- c) ゼロクロス法
- d) パルスオーバーラップ法

b), c), d) の計測精度の差は小さく、それぞれの特徴があるので、附属書 A を参照して適切な測定方法を選択する。

7.7 超音波探触子

計測装置には、測定目的に応じて、表 5 から適切な探触子を選択して使用する。探触子のビーム中心軸の偏り角は JIS Z 2350 によって測定し、1° 以内とする。表 5 には、これら探触子の高精度測定への適否についても示した。

圧電素子を利用した探触子については、周波数 2 MHz～10 MHz を推奨する。減衰の小さい材料に対しては、周波数が高く、パルス幅が短いエコーを生じる広帯域探触子が精度向上に有利である。減衰の大きい材料に対しては、低い周波数の探触子を選択し、伝搬に伴う波形変化を低減する。

表 5—探触子の選定

波のモード	探触子の種類	高精度測定への適否
縦波	一振動子縦波垂直探触子	○
	二振動子縦波垂直探触子	×
	遅延材付き縦波探触子	△
	水浸探触子	△
横波	一振動子横波垂直探触子	○
	遅延材付き横波探触子	△
	電磁超音波探触子	○
○：適する， ×：適さない， △：適するが、遅延材又は水の温度変化による測定系の設定不具合に注意		

7.8 接触媒質

接触法で超音波を送受信する探触子については、縦波音速又は横波音速のいずれを測定するかによって、表 6 から接触媒質を選択し、その厚さは必要最小限とする。

表 6—接触媒質の選択

測定の種類	接触媒質の種類
縦波音速の測定	グリセリンペースト、濃度 75% 以上のグリセリン水溶液、水、オイル、音響インピーダンスが明らかな液体。
横波音速の測定	横波用接触媒質として市販されている製品、横波の伝達に適した高粘度の液体、又は接着剤。

8 音速測定 of 共通事項

8.1 試験体の機械的厚さ測定

正しく校正されているマイクロメータなどの測定器を用いて、試験体の厚さを必要な精度（表 2 参照）で読みとる。測定部の表裏面は汚れなどが無い状態とし、表面状態に起因する測定誤差を最小限とする。また、測定は音速測定位置で複数回行い、平均値を板厚として採用する。

8.2 エコー及び透過波の検出

エコー及び透過波の検出は次による。

- a) **縦波による接触法の場合** 図 2 のように接触媒質を介して試験体表面に探触子を密着させ、底面エコーを観測する。また、裏面には接触媒質などの超音波反射に影響する物質を付着させない。
二振動子探触子を用いる場合は、図 4 のように接触媒質を介して試験体表面に二振動子探触子を密着させ、底面エコーを観測する。
透過法の場合は、図 5 のように試験体表裏の対向する位置に接触媒質を介して探触子を密着させ、透過波を観測する。
- b) **水浸法の場合（縦波）** 図 3 又は図 8 のように探触子からの超音波ビームが試験体表面に垂直に入射するよう調整し、底面エコー又は透過波を観測する。反射法の場合、適切な水距離を設定して、目的のエコー（ B_i エコー及び B_j エコー）を S_1 エコーと S_2 エコーとの間に位置させる（図 3 では B_1 エコー及び B_2 エコーの例）。透過法の場合、水距離はなるべく小さくし、かつ、目的の透過波を他のエコーから完全に分離できる状態に調整する。
- c) **横波による接触法の場合** 図 2 のように接触媒質を介して試験体表面に探触子を密着させ、底面エコーを観測できる状態にする。振動方向によって音速が異なる場合には、音速が大きい振動方向及びその直角の振動方向（音速が小さい）の両方向で計測する。また、裏面には接触媒質などの超音波反射に影響する物質を付着させない。透過法の場合、図 5 と同様に探触子を設定する。

8.3 温度管理

この規格では、温度制御を規定しない。ただし、測定系に水などの液体及び遅延材を含む場合及び／又は高精度な測定を行う場合には、温度変化の影響を排除するため、測定値に経時的な変化がないことを確認する。測定時の試験体温度は記録しておく。

なお、試験体温度が環境温度と平衡している場合は、環境温度の記録だけでよい。

水浸透過法では、水距離を小さくするとともに、測定の前後に試験体を除いた状態で透過波の伝搬時間を測定し、温度による水中音速変化の有無を確認し、必要に応じて再測定を行う。

8.4 再現性の確認

再現性の確認を必要とする場合には、測定面から一旦探触子を外してから再測定する作業を必要に応じて繰り返し、音速値のばらつきがあらかじめ定めた許容値以内であることを確認する。音速測定値の平均、最大、最小などを求める。

8.5 測定位置

端面からの距離の規定（表 2）を満たす試験体上の位置で測定する。

9 高精度の音速測定

9.1 音速測定方法の種類

高精度な音速測定法として、パルサーレーザシステムなどによる伝搬時間測定を用いた方法、シングアラウンドによる方法及び電磁超音波共鳴による方法を規定する。

9.2 パルサーレーザシステムなどによる方法

測定装置としてパルサーレーザシステムを用い、接触型探触子又は水浸探触子を用いて、多重エコーを検出する。多重エコーの中で、波形変化の少ない二つの底面エコー B_i 、 B_j の組み合わせを選択し、送信パルス、同期信号など又はエコー（表面エコーなど）を伝搬時間測定起点としたそれぞれの伝搬時間（以下、起点から測定した伝搬時間） T_{Si} 及び T_{Sj} 、又は二つのエコー B_i と B_j との伝搬時間差 ΔT_{ij} を**附属書 A**のパルスオーバーラップ法、ゼロクロス法、又はスライスレベル法で求める。多重反射の次数が高くなると、波形の変形が大きくなるので、通常、 B_1 及び B_2 の組み合わせ又は B_1 及び B_3 の組み合わせを選択する。

二つの底面エコー B_i 、 B_j のそれぞれについて、起点からの伝搬時間 T_{Si} 、 T_{Sj} を測定する場合は、音速 V を式(1)によって計算する。

$$V = \frac{2t_s \cdot (j - i)}{T_{Sj} - T_{Si}} \times 1\,000 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、
 t_s : 試験体の厚さ (mm)
 i : 試験体底面での超音波反射回数
 j : 試験体底面での超音波反射回数 ($j > i$)
 T_{Si} : 底面エコー B_i について起点から測定した伝搬時間 (μs)
 T_{Sj} : 底面エコー B_j について起点から測定した伝搬時間 (μs)
 V : 音速 (m/s)

二つの底面エコー B_i 、 B_j の伝搬時間差 ΔT_{ij} を測定する場合は、音速 V を式(2)によって計算する。

$$V = \frac{2t_s \cdot (j - i)}{\Delta T_{ij}} \times 1\,000 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、
 t_s : 試験体の厚さ (mm)
 i : 試験体底面での超音波反射回数
 j : 試験体底面での超音波反射回数 ($j > i$)
 ΔT_{ij} : 底面エコー B_i と底面エコー B_j との伝搬時間差 (μs)
 V : 音速 (m/s)

必要に応じて複数回測定し、音速値のばらつきがあらかじめ定めた許容値以内であることを確認し、試験体温度も記録する。

時間分解能が 2.5ns 以下のデジタル探傷器及び超音波厚さ計を用いる場合には、上記に準じて音速を測定する。

9.3 シングア라운드法による方法（附属書 B 参照）

シングア라운드測定装置を用い、接触型探触子又は水浸探触子を用いて、多重エコーを検出する。多重エコーの中で、波形変化の少ない二つのエコー B_i 、 B_j の組み合わせを選択し、 B_i の伝搬時間をループに組み込んで測定した送信周期 T_{Ci} 、 B_j の伝搬時間をループに組み込んで測定した送信周期 T_{Cj} を式(B.1)で求める。多重反射の次数が高くなると、波形の変形が大きくなるので、通常、 B_1 及び B_2 の組み合わせ又は B_1 及び B_3 の組み合わせを選択する。

必要に応じて複数回測定し、音速値のばらつきがあらかじめ定めた許容値以内であることを確認し、試験体温度も記録する。

9.4 電磁超音波共鳴法による方法（附属書 C 参照）

測定対象は横波の音速であり、電磁超音波共鳴装置と附属書 C の図 C.2 に示す方向性コイル（トラック状コイル）を内蔵した電磁超音波探触子とを組み合わせ、共鳴スペクトルを取得する。掃引周波数は共鳴スペクトルの形状が崩れない範囲で適切に選択する。

横波の振動方向によって音速が異なるか確認するため、探触子を回転し、共鳴周波数の変化を観測する。共鳴周波数の変化がない場合には、隣接する共鳴周波数 f_1 , f_2 を求め、式(C.1)によって音速を計算する。共鳴周波数の変化がある場合には、探触子の向きを調整し、高い共鳴周波数での振幅が最大となる向きで止め、隣接する共鳴周波数 f_1 , f_2 を求め、式(C.1)によって大きい方の音速を計算する。次に、探触子の向きを調整し、低い共鳴周波数での振幅が最大となる向きで止め、隣接する共鳴周波数 f_1 , f_2 を求め、式(C.1)によって小さい方の音速を計算する。

必要に応じて複数回測定し、音速値のばらつきがあらかじめ定めた許容値以内であることを確認し、試験体温度も記録する。

10 普通精度の音速測定

10.1 伝搬時間測定方法の種類及び波の検出方法の種類

音速測定のための伝搬時間測定は、附属書 A のピークポイント法、ゼロクロス法又はスライスレベル法のいずれかによる。波の検出方式は、次から選択する。

- a) $B_i - B_j$ 方式
- b) $S - B_1$ 方式
- c) $R - B_1$ 方式
- d) $R - U$ 方式

超音波の減衰が大きい材料においては、エコー又は透過パルスの周波数が探触子の公称周波数より低域側に移動する可能性がある。このような場合には、音速測定値の誤差が大きい可能性があるため、測定値に"周波数低下"のコメント又はエコーの中心周波数の数値を付記する。

10.2 パルサーレーザシステム又はデジタル探傷器を用いる場合

- a) **$B_i - B_j$ 方式** 波形の相違が小さく、ノイズが小さい二つの底面エコー B_i , B_j の組み合わせを選択し、起点から測定したそれぞれの伝搬時間 T_{Si} 及び T_{Sj} 又は二つのエコー B_i と B_j との伝搬時間差 ΔT_{ij} を測定し、音速 V を式(1)又は式(2)によって計算する。

デジタル探傷器のビーム路程表示を利用する場合には、底面エコー B_i のビーム路程 L_{Si} 、底面エコー B_j のビーム路程 L_{Sj} 及び探傷器の音速設定値 V' から、式(3)によって音速 V を計算する。式(3)では L_{Si} 及び L_{Sj} は片道のビーム路程を示す。

$$V = V' \times \frac{t_s \cdot (j - i)}{L_{Sj} - L_{Si}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

- ここで、
- t_s : 試験体の厚さ (mm)
 - i : 試験体底面での超音波反射回数
 - j : 試験体底面での超音波反射回数 ($j > i$)
 - L_{Si} : 底面エコー B_i のビーム路程 (mm)
 - L_{Sj} : 底面エコー B_j のビーム路程 (mm)
 - V' : 音速設定値 (m/s)
 - V : 音速 (m/s)

- b) **S-B₁方式** 試験体の表面エコー及び第1回底面エコーについて起点から測定した伝搬時間 T_{FS} 及び T_{BS} 又は試験体の表面エコーと第1回底面エコーとの伝搬時間差 ΔT_{FB} を測定し、音速を式(4)又は式(5)によって計算する。表面エコーと底面エコーとの位相が異なる場合には、測定が全波検波波形で行われる場合を除いて、片方のエコーについて正負反転した波形を用いて伝搬時間を測定する。附属書 A.1.2 参照。

$$V = \frac{2t_S}{T_{BS} - T_{FS}} \times 1\,000 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、
 t_S : 試験体の厚さ (mm)
 T_{FS} : 表面エコーについて、起点から測定した伝搬時間 (μs)
 T_{BS} : 第1回底面エコーについて、起点から測定した伝搬時間 (μs)
 V : 音速 (m/s)

$$V = \frac{2t_S}{\Delta T_{FB}} \times 1\,000 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、
 t_S : 試験体の厚さ (mm)
 ΔT_{FB} : 表面エコーと底面エコーとの伝搬時間差 (μs)
 V : 音速 (m/s)

デジタル探傷器のビーム路程表示を利用する場合、ビーム路程表示が表面エコーを起点としていないときには、表面エコー及び第1回底面エコーの測定値 L_{FS} 、 L_{FB} 及び探傷器の音速設定値 V' から、式(6)によって音速を計算する。また、ビーム路程表示が表面エコーを起点とするときには、第1回底面エコーのビーム路程値 ΔL_{FB} 及び探傷器の音速設定値 V' から、式(7)によって音速を計算する。

$$V = V' \times \frac{t_S}{L_{FB} - L_{FS}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、
 t_S : 試験体の厚さ (mm)
 L_{FS} : 表面エコーのビーム路程 (mm)
 L_{FB} : 底面エコーのビーム路程 (mm)
 V' : 音速設定値 (m/s)
 V : 音速 (m/s)

$$V = V' \times \frac{t_S}{\Delta L_{FB}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、
 t_S : 試験体の厚さ (mm)
 ΔL_{FB} : 表面エコーを起点とした第1回底面エコーのビーム路程 (mm)
 V' : 音速設定値 (m/s)
 V : 音速 (m/s)

- c) **R-B₁方式** ゼロ点調整用試験片の第1回底面エコー B_{R1} 及び第2回底面エコー B_{R2} について起点から測定した伝搬時間 T_{R1} 及び T_{R2} を求める。次に、試験体を用いて、第1回底面エコー B_1 について起点

から測定した伝搬時間 T_{BS} を求める (図 6 及び図 7 参照)。式(8)によって音速を計算する。

$$V = \frac{2t_s}{T_{BS} - (2T_{R1} - T_{R2})} \times 1\,000 \dots\dots\dots(8)$$

- ここで、
- t_s : 試験体の厚さ (mm)
 - T_{BS} : 試験体の B_1 について起点から測定した伝搬時間 (μs)
 - T_{R1} : ゼロ点調整用試験片の第 1 回底面エコー B_{R1} について、起点から測定した伝搬時間 (μs)
 - T_{R2} : ゼロ点調整用試験片の第 2 回底面エコー B_{R2} について、起点から測定した伝搬時間 (μs)
 - V : 音速 (m/s)

デジタル探傷器のビーム路程表示を利用する場合には、ゼロ点調整用試験片の第 1 回底面エコー B_{R1} のビーム路程 L_{R1} 及び第 2 回底面エコー B_{R2} のビーム路程 L_{R2} を求め、試験体の第 1 回底面エコー B_1 のビーム路程 L_{BS} を求めて、式(9)によって音速を計算する。

$$V = V' \times \frac{t_s}{L_{BS} - (2L_{R1} - L_{R2})} \dots\dots\dots(9)$$

- ここで、
- t_s : 試験体の厚さ (mm)
 - L_{BS} : 試験体の B_1 のビーム路程 (mm)
 - L_{R1} : ゼロ点調整用試験片の B_1 のビーム路程 (mm)
 - L_{R2} : ゼロ点調整用試験片の B_2 のビーム路程 (mm)
 - V' : 音速設定値 (m/s)
 - V : 音速 (m/s)

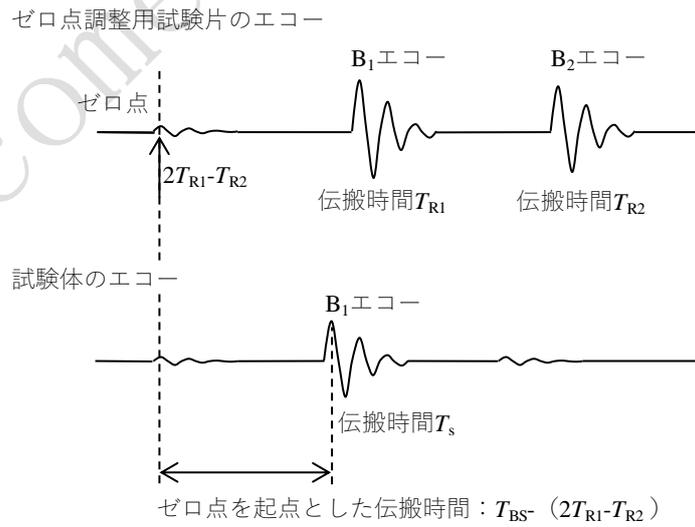


図2. ゼロ点調整用試験片を用いた測定

図 6—ゼロ点調整用試験片を用いた測定

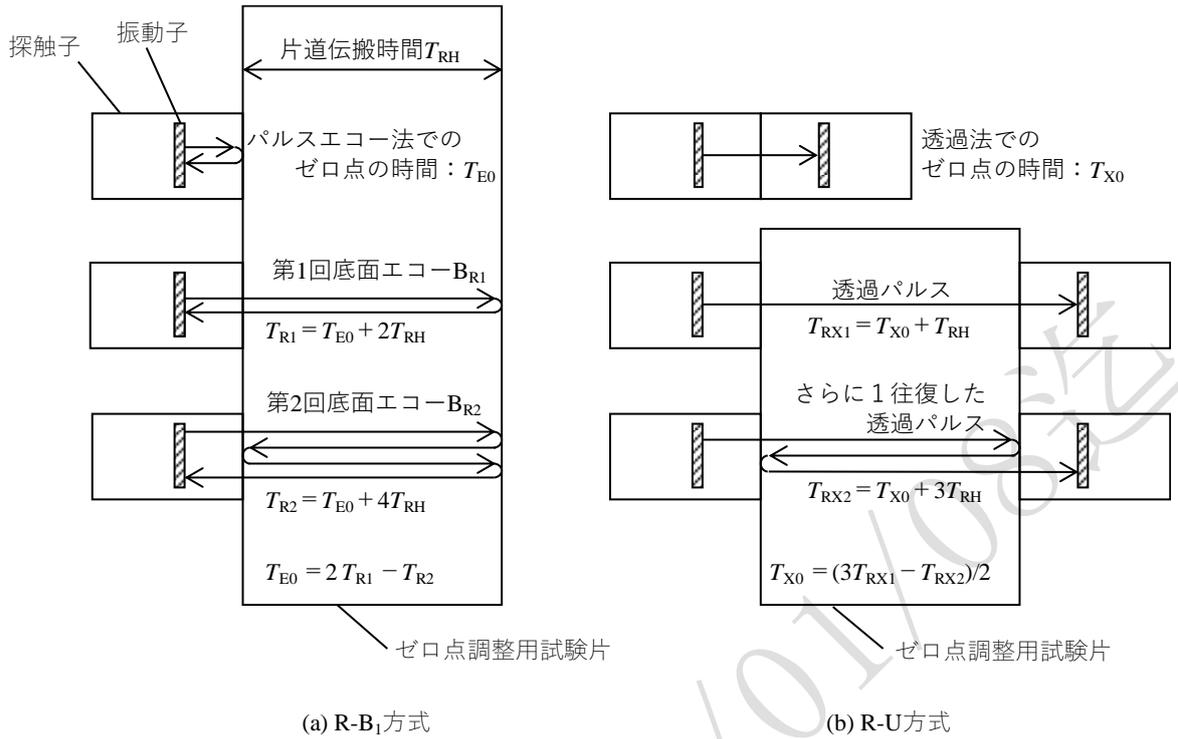


図 7— R—B₁ 方式及び R—U 方式でのゼロ点の求め方

d) **R—U 方式** 二つの探触子を用いて、片方を送信用、他方を受信用として動作させ、試験体を透過するパルスを検出して (図 5 参照)、音速を求める。パルサーレーザシステム又はデジタル探傷器は二探触子法の設定で計測する。

- 1) **接触型探触子による場合** ゼロ点調整用試験片の透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間 T_{RX1} 及び内部でさらに 1 往復した透過パルスの起点から測定した伝搬時間 T_{RX2} を求める。次に、試験体の透過パルスについて起点から測定した伝搬時間 T_{SX} を求め、式(10)によって音速を計算する (図 7 参照)。

$$V = \frac{2t_s}{2T_{SX} - (3T_{RX1} - T_{RX2})} \times 1\,000 \dots\dots\dots(10)$$

- ここで、
- t_s : 試験体の厚さ (mm)
 - T_{RX1} : ゼロ点調整用試験片の透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間 (μs)
 - T_{RX2} : ゼロ点調整用試験片内部でさらに 1 往復した透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間 (μs)
 - T_{SX} : 試験体透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間 (μs)
 - V : 音速 (m/s)

デジタル探傷器のビーム路程表示を利用する場合には、ゼロ点調整用試験片の透過パルスのビーム路程 L_{RX1} 及び内部でさらに 1 往復した透過パルスのビーム路程 L_{RX2} を求め、試験体の透過パルスの

ビーム路程 L_{SX} を求めて、式(11)によって音速を計算する。

$$V = V' \times \frac{t_S}{2L_{SX} - (3L_{RX1} - L_{RX2})} \dots\dots\dots(11)$$

ここで、
 t_S : 試験体の厚さ (mm)
 L_{SX} : 試験体の透過パルスのビーム路程 (mm)
 L_{RX1} : ゼロ点調整用試験片の透過パルスのビーム路程 (mm)
 L_{RX2} : ゼロ点調整用試験片内部でさらに 1 往復した透過パルスのビーム路程 (mm)
 V' : 音速設定値 (m/s)
 V : 音速 (m/s)

- 2) **水浸探触子による場合** 二つの水浸探触子をビーム中心軸を合わせて対向させ、その間に試験体を設置した場合の透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間 T_{ISX} 及び設置しない場合の透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間 T_{IX} から音速を求める (図 8 参照)。音速は式(12)によって計算する。

$$V = \left\{ \frac{1}{V_W} - \frac{(T_{IX} - T_{ISX})}{t_S \times 1\,000} \right\}^{-1} \dots\dots\dots(12)$$

ここで、
 t_S : 試験体の厚さ (mm)
 T_{ISX} : 試験体があるときの透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間 (μ s)
 T_{IX} : 試験体がないときの透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間 (μ s)
 V_W : 水中の音速 (m/s)
 V : 音速 (m/s)

水中の音速 V_W は、探触子間隔を Δt_W だけ変更したときの、変更前後の透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間 T_{IX1} 及び T_{IX2} を求め、式(13)によって計算する。

$$V_W = \frac{\Delta t_W}{T_{IX2} - T_{IX1}} \times 1\,000 \dots\dots\dots(13)$$

ここで、
 Δt_W : 水距離の変更分 (mm)
 T_{IX1} : 水距離変更前の透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間 (μ s)
 T_{IX2} : 水距離変更後の透過パルスについて、起点から測定した伝搬時間 (μ s)
 V_W : 水中の音速 (m/s)

デジタル探傷器のビーム路程表示を利用する場合には、試験体があるときの透過パルスのビーム路程 L_{ISX} 、試験体がないときの透過パルスのビーム路程 L_{IX} 及び探傷器の音速設定値 V' から、式(14)によって音速を計算する。

$$V = \left\{ \frac{1}{V_W} - \frac{2}{V'} \cdot \frac{(L_{IX} - L_{ISX})}{t_S} \right\}^{-1} \dots\dots\dots(14)$$

ここで、
 t_S : 試験体の厚さ (mm)
 L_{ISX} : 試験体があるときの透過パルスのビーム
 路程 (mm)
 L_{IX} : 試験体がないときの透過パルスのビーム
 路程 (mm)
 V_W : 水中の音速 (m/s)
 V' : 音速設定値 (m/s)
 V : 音速 (m/s)

水中の音速 V_W は、探触子間隔を Δt_W だけ変更したときの、変更前後の透過パルスのビーム路程 L_{IX1} 及び L_{IX2} を測定し、式(15)によって計算する。

$$V_W = V' \times \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t_W}{L_{IX2} - L_{IX1}} \dots\dots\dots(15)$$

ここで、
 Δt_W : 水距離の変更分 (mm)
 L_{IX1} : 水距離変更前の透過パルスのビーム路程
 (mm)
 L_{IX2} : 水距離変更後の透過パルスのビーム路程
 (mm)
 V_W : 水中の音速 (m/s)
 V' : 音速設定値 (m/s)

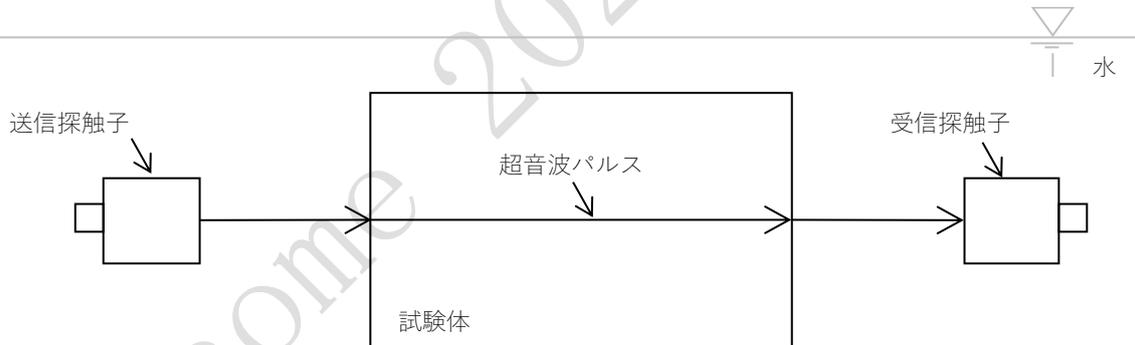


図 8—水浸パルス透過法

10.3 超音波厚さ計又は音速計を用いる場合

伝搬時間測定に用いる波の検出方式を選択できる機種については、表 4 の B_i-B_j 方式、 $S-B_1$ 方式又は $R-B_1$ 方式から選択する。また、伝搬時間測定方法が選択できる場合には、附属書 A.1.3 に従い適切な手法を設定する。選択できない機種については、伝搬時間測定に用いる波の検出方式及び伝搬時間測定方法を確認しておく。

- a) **超音波厚さ計を使用する場合** $R-B_1$ 方式を選択した場合には、ゼロ点調整用試験片などで厚さ計のゼロ点を調整しておく。適切な接触媒質を介して探触子を試験体に密着させて試験体の厚さを表示させ、音速設定値を調整することによって、表示される厚さをあらかじめ機械的に測定しておいた厚さに合わせ、このときの音速設定値を読みとる。

- b) 音速計を使用する場合** R-B₁方式を選択した場合には、ゼロ点調整用試験片などを用いて音速計のゼロ点を調整しておく。あらかじめ音速計へ試験体の厚さを入力したうえで、適切な接触媒質を介して探触子を試験体に密着させ、音速を表示させる。

10.4 温度変化の影響の確認

水中音速の温度係数(2~4 m/s/K)は大きいので、音速測定値は測定中の温度変化の影響を受けやすい。測定の最後に最初の測定と同じ条件及び配置で伝搬時間を再測定し、伝搬時間のばらつきがあらかじめ定めた許容値以内であることを確認する。特に、水距離が大きく、試験体が薄い場合にばらつきが大きくなりやすい。

11 測定結果の表示方法

測定した音速は、縦波の場合には記号 V_L 、横波の場合には記号 V_S を用いて表現し、m/s の単位で表す。横波で異なる二つの音速値が得られた場合には、それぞれを V_{S1} 、 V_{S2} とし、その振動方向も含めて表示する。

また、音速測定の再現性確認を行った場合には、音速の平均値、最大値、最小値などを表示する。

記録には、次の事項を記載する。

- a) 測定した音速の値
- b) 可能ならば、音速値の測定に使用した超音波波形
- c) 伝搬時間測定に用いる波の検出方式及び伝搬時間測定方法
- d) 使用した機材の種類及び形式
- e) ゼロ点調整用試験片を使用した場合には、試験片の型名、材質、寸法
- f) 測定面及び裏面の仕上げ状態
- g) 試験体の厚さ測定結果
- h) 使用した接触媒質
- i) 試験体温度

附属書 A (規定) 伝搬時間の測定方法

A.1 一般的注意事項

A.1.1 波形の確認

超音波の伝搬時間（超音波がある点から別の点へ伝搬するのに要する時間）を測定するためには、ある点と別の点とで観察される二つの超音波波形にそれぞれ測定ポイントを決めて、その間の時間差を測定する必要がある。減衰の小さい材料では、伝搬中の波形の変形が小さいため、波形内の相似な点を測定ポイントとして選ぶことによって、伝搬時間の測定が高精度となる。

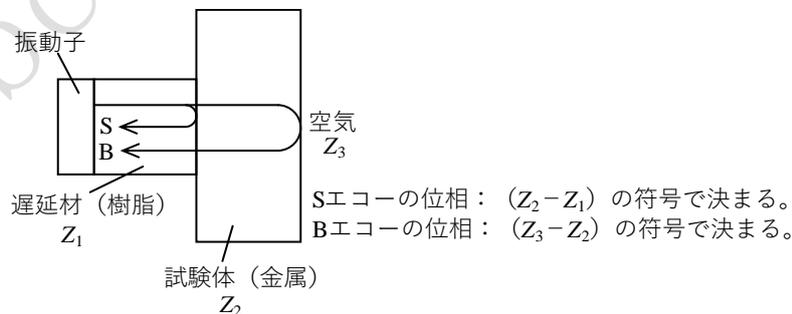
減衰が大きい材料では、超音波の高周波成分が多く失われる傾向にあるため、伝搬中に波形の変形が生じて伝搬時間の測定に誤差が発生する。これを回避するため、通常、より低い周波数の超音波を利用する、試験体の厚さを薄くするなどの対策で、波形の変形を最小に抑えて伝搬時間を計測する。

測定において二つの波形が微妙に異なる場合には、波形の立上がり部分を波形相似点と考えて測定すること又は大きな振幅部に波形相似点を見出して測定することが多い。前者は、最も早く到達する波形先頭部には外乱が少ないことを利用し、後者は、最もエネルギーの大きな部分が波形主要部とみなせることを利用している。

A.1.2 位相反転時の対応

遅延材付き探触子を用いて、表面エコーと底面エコーとの伝搬時間差を測定する場合に、底面エコーの波形が表面エコー（S）の波形に対して位相反転していることが多い。樹脂製の遅延材と金属製の試験体との組合せでは、音響インピーダンスの大きさは、 Z_2 （金属試験体） $> Z_1$ （樹脂遅延材） $> Z_3$ （空気）の順となる。このときに、樹脂遅延材と金属試験体との境界からの表面エコー（S）では位相反転が起きないが、金属試験体と空気との境界面からの底面エコー（B）には位相反転が生じる（**図 A.1** 参照）。位相反転は RF 波形を用いた測定における誤差の原因となるため、二つのエコーの片方について正負反転した波形を用いて測定を行う。全波検波波形での測定では位相反転に注意する必要はない。

また、直接接触型探触子でも、前面板の音響インピーダンスが試験体の音響インピーダンスより大きいと B_1 エコーの位相と B_2 エコーの位相とが反転する場合がある。



注記 Z_1 , Z_2 , Z_3 は音響インピーダンス

図 A.1—遅延材付き探触子における反射波の位相変化

A.1.3 伝搬時間の測定方法の選択

伝搬時間の測定方法は、必要な精度に応じて、表 A.1 から選択する。

表 A.1—測定方法の選択

要求条件	使用波形	伝搬時間の測定方法	
高精度	RF 波形	スライスレベル法 ゼロクロス法 パルスオーバーラップ法	内容は A.2, A.3 を参照
普通精度 (減衰小)	RF 波形 全波検波波形	ピークポイント法 スライスレベル法	
普通精度 (減衰大)	RF 波形	パルスオーバーラップ法	
	全波検波波形	ピークポイント法 スライスレベル法	

A.2 伝搬時間の測定方法

A.2.1 ピークポイント法

伝搬時間の測定ポイントを最大エコー高さ点とする（図 A.2 参照）。検波波形に適用する場合及び RF 波形に適用する場合がある。RF 波形を利用する場合には測定ポイントを同じ位相の点に設定し、波形の変形の影響を避ける。

RF 波形の利用は精度的に有利であるが、測定ポイントを同じ位相の点に設定しなければならない。検波波形の利用は、精度を必要としない簡易測定に限られる。

デジタル探傷器が時間計測機能をもつ場合には、その機能を使って、デジタル表示される値を用いる。

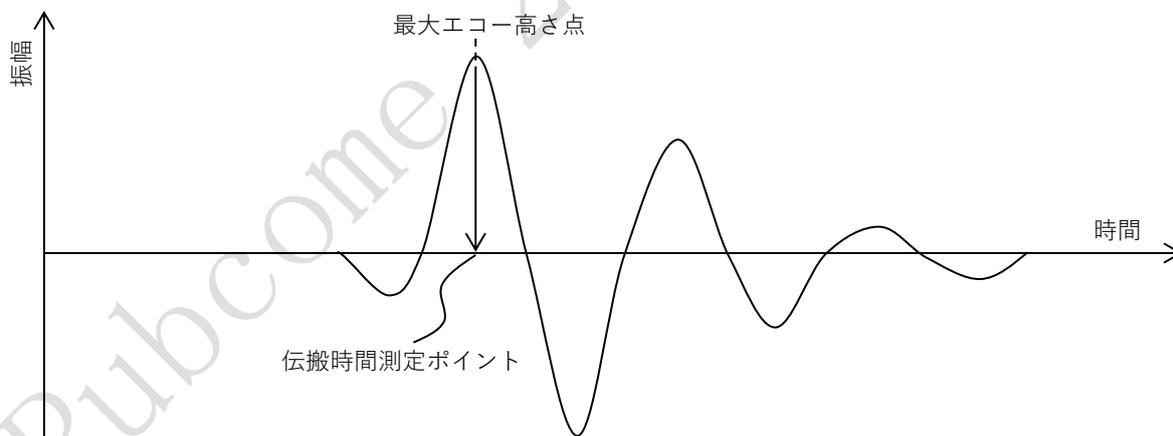


図 A.2—ピークポイント法

A.2.2 スライスレベル法

スライスレベル法では、エコー高さをフルスケールの 80 %程度に設定して、エコー高さを基準にスライスレベルを規定する（例えば、エコー高さ-6 dB 場合（図 A.3 参照）と、エコーを高利得増幅して大振幅とし、スライスレベルをノイズを拾わない範囲内であるべく低いレベルとする場合がある。この方法では、スライスレベルを超えた点を測定ポイントとして伝搬時間を測定する。立上がりが見やすい波形については伝搬時間測定精度が高い。

デジタル探傷器が時間計測機能をもつ場合には、その機能を使って、デジタル表示される値を用いる。

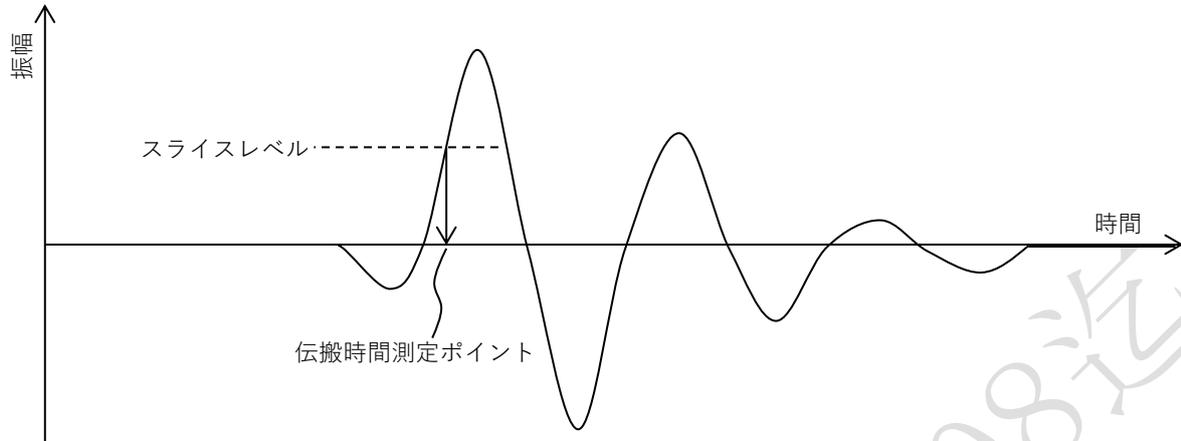


図 A.3—スライスレベル法

A.2.3 ゼロクロス法

ゼロクロス法は波形の測定ポイントをゼロクロス点に設定し（図 A.4 参照）、エコーの伝搬時間を高精度で求める方法であり、二つの波形の安定した相似部分に設定する。波形をパソコンに取り込みゼロクロス法を適用することもできる。波形に設定するゼロクロス点には幾つかの候補点があるので、図 A.4 ではこの複数の候補点を示した。

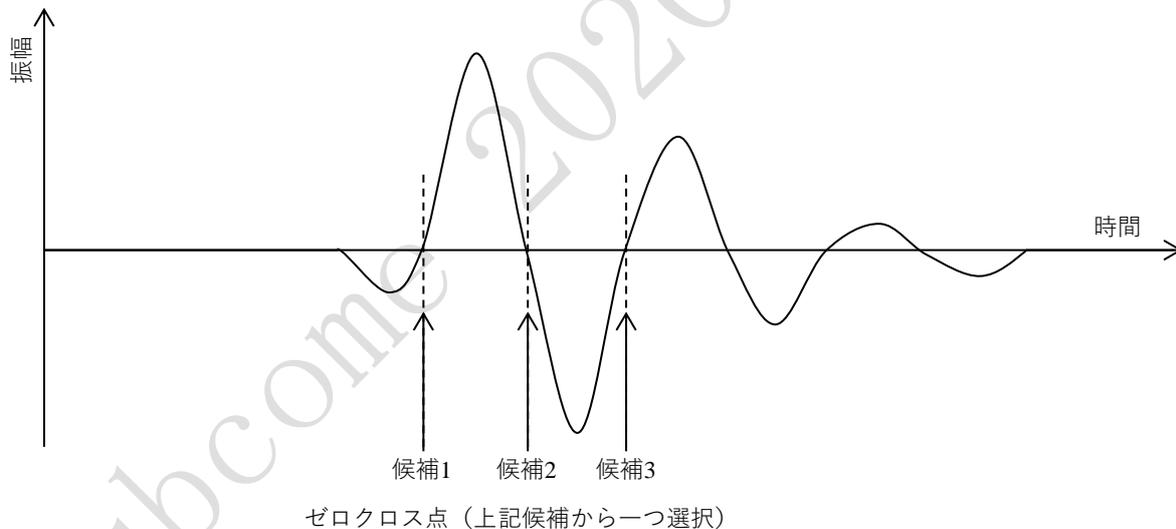


図 A.4—ゼロクロス法

A.2.4 パルスオーバーラップ法

パルスオーバーラップ法は、二つのエコーの時間差を高精度で求める方法であり、第1の波の表示波形と第2の波の表示波形とを遅延量を調整して重ね合わせ、両者の位相の一致度合いを目視で確認しながら最適の遅延量を求めることによって、時間差測定を行う。図 A.5 に示すパルスオーバーラップ装置は、波形の記録表示機能をもつデジタルオシロスコープを利用して構成している。

具体的には、初めに同期信号からの遅延量を調整して第1の波をデジタルオシロスコープに表示し、このときの遅延量 T_{P1} をカウンタで計測する。次に、遅延量を増し、第2の波の表示が既に表示している第1

の波に丁度重なる状態とし、このときの遅延量 T_{p2} をカウンタで計測する。このようにして、第1の波と第2の波との伝搬時間差を両者の差($T_{p2} - T_{p1}$)で求めることができる(図 A.6 参照)。音速を 1 m/s の桁まで測定できるように、時間間隔の測定に使用するカウンタの精度は少なくとも $10^{-3} \mu\text{s}$ (1 ns) 以下であることが望ましい。

この方法は、位相の一致度合いを確認しながら時間計測を行うことが可能なため、時間測定精度が高い。また、波形の相似度を正確に判断できるので、信頼性も高い。

高精度の時間差測定では小さな誤差要因にも注意が必要であるが、この方法は誤差要因に対処しやすい方法であり、その例を**附属書 D**に示した。

近年はロングメモリのデジタルオシロスコープも市販品で入手可能であり、第1の波及び第2の波を含む波形を一つの波形データとして取り込み、パソコン上でデジタルデータを用いてパルスオーバーラップ法を行える。また、パソコン上で第1の波と第2の波との相互相関解析を行うことによって、伝搬時間(相関係数が最大になる遅延時間)の測定精度が向上する。

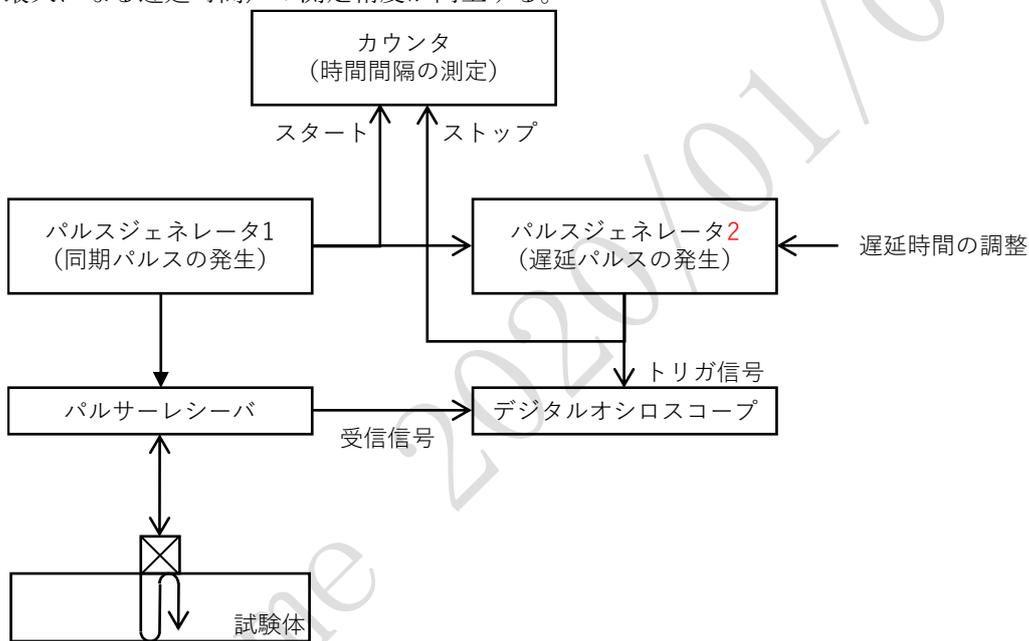


図 A.5—パルスオーバーラップ法ブロック図

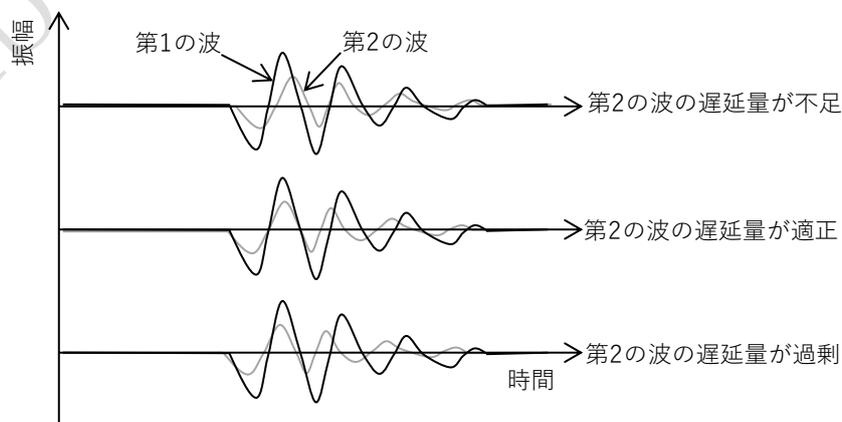


図 A.6—パルスオーバーラップ説明図

附属書 B (規定) シングア라운드法による音速測定

B.1 測定原理

シングア라운드法では、**図 B.1** のブロック図のとおり、超音波送信周期が第 1 回底面エコー、第 2 回底面エコーなどの超音波伝搬時間に依存する信号の巡回ループを形成し、その送信周期を測定することによって、超音波伝搬時間の差を測定する。超音波送信周期が第 2 回底面エコーの伝搬時間に依存するループにおける送信周期と超音波送信周期が第 1 回底面エコーの伝搬時間に依存するループにおける送信周期との差が第 2 回底面エコーと第 1 回底面エコーとの伝搬時間差となる。送信周期の測定は、連続する数多くの送信周期にわたり、クロックパルスカウンタで積算して平均化するため、測定精度が向上する。

図 B.1 では、ゲート回路で切り出した第 1 回底面エコー及び第 2 回底面エコーがゼロクロスする時点でタイミング信号を生成している。二つのエコーを用いた測定において、ゲート回路で目的のエコーを抽出し、両エコー間で相似したゼロクロス点を検出しなければならない。

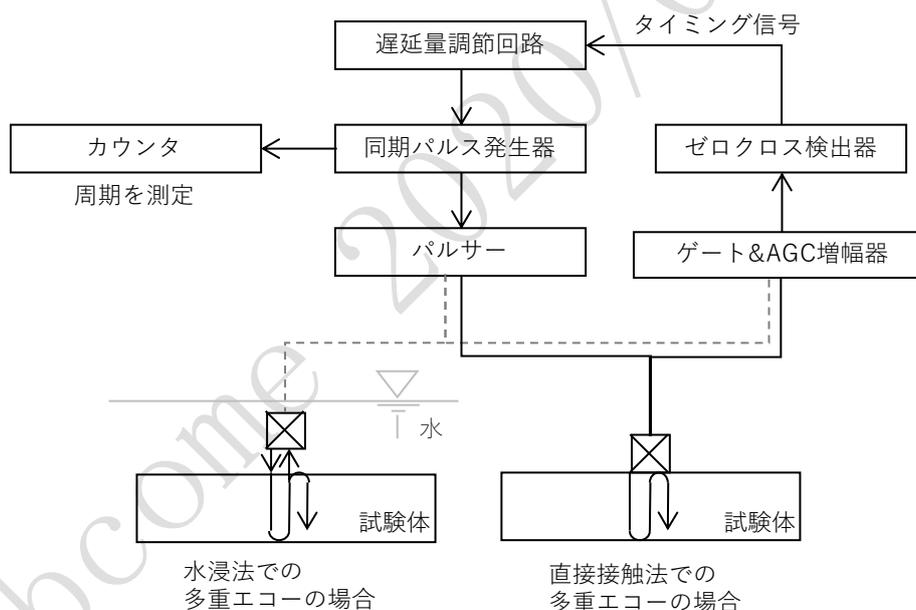


図 B.1—シングア라운드法

B.2 装置の構成

装置の構成は次による。

- a) **ゲート及び AGC 増幅器** 目的のエコーを切り出し、振幅が一定となる状態に自動的にゲインを調節して増幅する。
- b) **ゼロクロス検出器** 目的のエコーのゼロクロス点を検出してタイミング信号を生成する。
- c) **遅延量調節回路** 多重エコーなど目的外的エコーと目的のエコーとの重なりを防ぐために適切な遅延量を与える。

- d) **同期パルス発生器** パルサーにトリガ信号を入力する。
- e) **パルサー** 探触子に励振パルスを供給して、超音波を発生させる。
- f) **カウンタ** 同期パルス発生器が生成するトリガ信号が所定数に達するまでクロックパルスを計数することによって送信周期を測定する。

B.3 測定

図 B.1 において、超音波送信周期が第 i 回底面エコーの超音波伝搬時間に依存する信号の巡回ループを形成したときの超音波送信周期 T_{Ci} 、超音波送信周期が第 j 回底面エコーの超音波伝搬時間に依存する信号の巡回ループを形成したときの超音波送信周期 T_{Cj} を測定する。そのとき、測定精度を高めるため、カウンタにおけるトリガ信号の計数が 1 万回程度になるまでカウンタで計時を行う。音速は、式(B.1)によって求める。

$$V = \frac{2t_s \cdot (j - i)}{T_{Cj} - T_{Ci}} \times 1\,000 \quad \dots\dots\dots(B.1)$$

ここで、

- t_s : 試験体の厚さ (mm)
- i : 試験体底面での超音波反射回数
- j : 試験体底面での超音波反射回数 ($j > i$)
- T_{Ci} : 第 i 回底面エコーの超音波伝搬時間に依存する信号の巡回ループを形成したときの超音波送信周期 (μs)
- T_{Cj} : 第 j 回底面エコーの超音波伝搬時間に依存する信号の巡回ループを形成したときの超音波送信周期 (μs)
- V : 試験体の音速 (m/s)

附属書 C (規定)

電磁超音波共鳴法による横波音速の測定

C.1 測定原理

この方法では、バースト波を励振する電磁超音波探触子によって、試験体厚さ方向に連続した横波超音波を発生させ、その周波数を掃引して鋭い共鳴ピークが発生する周波数を検出することによって、その周波数及び板厚から横波音速を測定する。対象は金属などの導電性材料に限られるが、共鳴周波数を高精度に測定することによって、音速測定精度が向上する。(図 C.1 参照)。

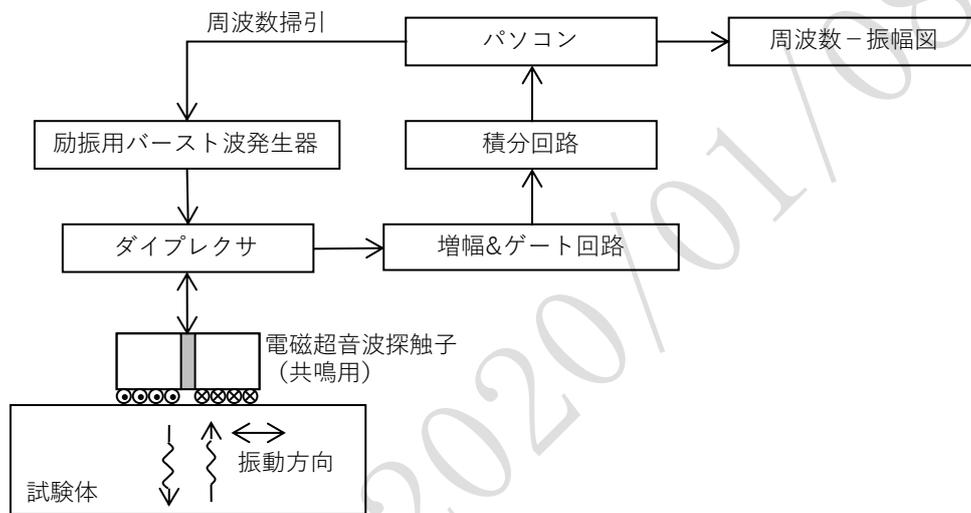


図 C.1—電磁超音波共鳴装置

C.2 装置の構成

装置の構成は次による。

- a) **電磁超音波探触子** コイルと永久磁石とで構成され、コイルに高周波バースト電流を流すことによって、ローレンツ力に基づく作用又は磁わい効果によって板厚方向に伝搬する横波超音波を発生する。また、電磁超音波探触子直下の表面に横波の振動が加わると、超音波発生と逆の作用で、コイルに電圧が発生し、横波が検出される。
- b) **ダイプレクサ** コイルに励振電流を加える回路とコイルに発生した受信電圧を増幅する回路とを切り換える。
- c) **増幅及びゲート回路** 電磁超音波探触子の励振終了後の部分を切り出し、検出電圧を増幅する。
- d) **積分回路** 電磁超音波の励振終了後の受信超音波を積分し、振幅を増大させる。
- e) **パソコン** 励振用バースト波の周波数を掃引し、また、積分回路の値を取り込み、周波数スペクトル(周波数-振幅図)を作成する。
- f) **励振用バースト波発生器** パソコンから設定された周波数の励振用バースト波を生成する。

C.3 測定

試験体に特定の振動方向の横波を送受信する方向性コイル（トラック状コイル）を備えた電磁超音波探触子（**図 C.2** 参照）を置き、電磁超音波探触子（以下、探触子という。）の向きを変えて共鳴スペクトルの変化を観測する。異方性がない材料では、探触子の向きを変えてもスペクトルに変化はなく、**図 C.3 a)**の周波数スペクトルが得られる。隣接するピークの周波数 f_1 , f_2 を計測し、式(C.1)によって音速 V を求める。試験体の厚さ t_s は、**7.1** によって測定する。

$$V = \frac{2 \cdot f_2 \cdot t_s}{r} \times 1\,000 \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

ここで、

- f_1 : 隣接するピークの低い方の周波数 (MHz)
- f_2 : 隣接するピークの高い方の周波数 (MHz)
- r : $\left(\frac{f_2}{f_2 - f_1}\right)$ を四捨五入した整数 (次数)
- t_s : 板厚 (mm)
- V : 音速 (m/s)

材料に異方性がある場合、横波の二つの独立な振動成分間で音速が異なるため、横波の振動方向によっては共鳴スペクトルに隣接した二つのピークが現れる [**図 C.3 b)**参照]。以下二つの異なる音速を V_{S1} 及び V_{S2} ($V_{S1} > V_{S2}$) とする。高いピーク周波数成分が最大となる振動方向 [**図 C.3 c)**参照] 及び低いピーク周波数成分が最大となる振動方向 [**図 C.3 d)**参照] で、それぞれピークの周波数を測定し、二つの方向の音速を計算する。

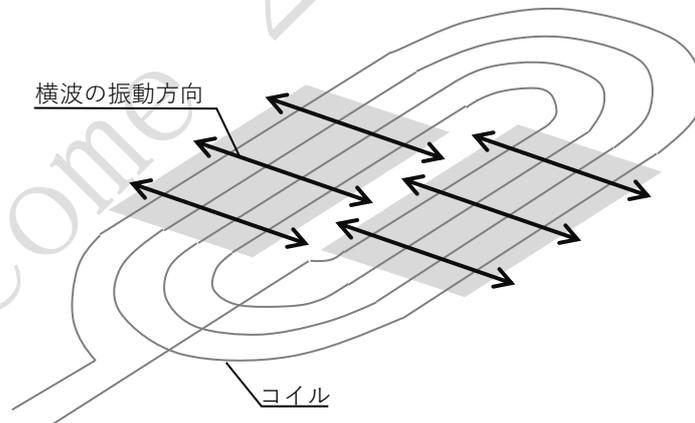
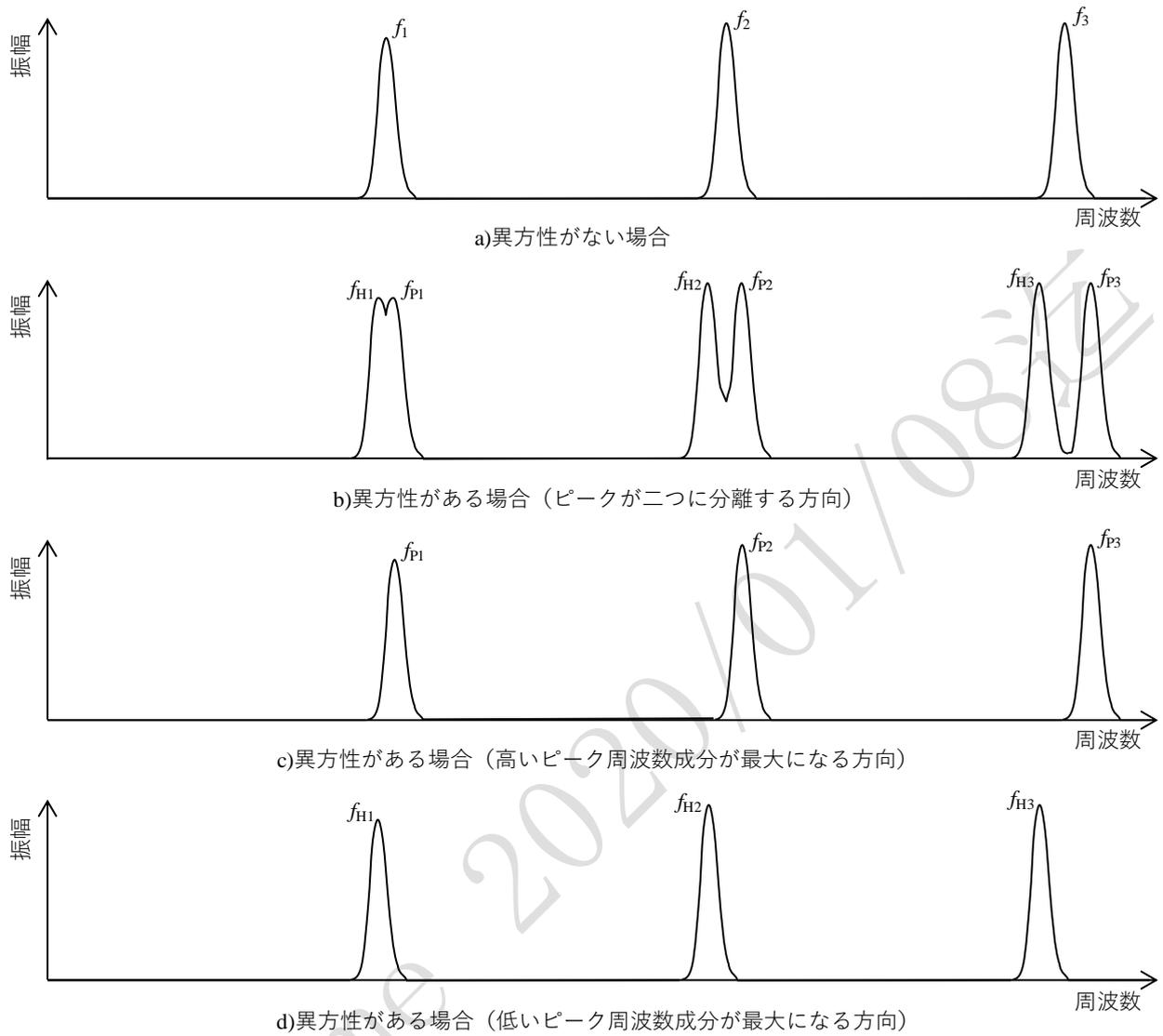


図 C.2—電磁超音波探触子の方向性コイル（トラック状コイル）



注記 模式的な説明図であり，実際とは異なる。

図 C.3—共鳴測定結果の説明

附属書 D

(参考)

パルスオーバーラップ法についての注意及び適用例

D.1 底面エコーの波形の変化

垂直探触子を用いて観測する底面エコーは、伝搬距離が変化したときに、振幅だけではなく波形も変形する。この波形の変形のうち、高周波数成分が先に減衰することによるエコー波形の変形は、よく知られているので、気づかれないような誤差を発生する可能性は少ない。しかし、減衰がほとんどない場合にも、超音波の伝搬距離が近距離音場限界距離に近いところでは、パルス波形は近距離音場に特有の波形から遠距離音場に特有の波形へと連続的に変形し、この変形はあまり知られていない。そのため、近距離音場限界距離に近い距離からのエコーを用いて A.2.4 のパルスオーバーラップ法によって音速を精密に測定する場合には、波形の変形の影響を考慮しておく必要がある。

図 D.1 は、厚さ t_s が 2.1 mm～210 mm までの鋼板からの B₁ エコーを、周波数 5 MHz、振動子径 10 mm の円形振動子（鋼内部での近距離音場限界距離は約 21 mm）によって観測する場合の波形を、減衰がないと仮定して計算した例を示している。時間軸は超音波が鋼板内部を伝搬する時間を差し引いて、波形を直接比べられるように調整してある。最初の 0.1 μs は探触子の前面板を超音波が往復する時間で、B₁ エコーはその直後からはじまる。鋼板の厚さは振幅の大きいほうから順に、2.1, 4.2, 10.5, 21, 42, 105, 210 mm（基準化距離 n は 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10）のように近距離音場限界距離の前後に分布するように選んだ。図 D.1 に示すように、振幅のピーク及びゼロ点は鋼板の厚さが増すと少しずつ左に移動するように変化する（以下、位相シフトという。）。

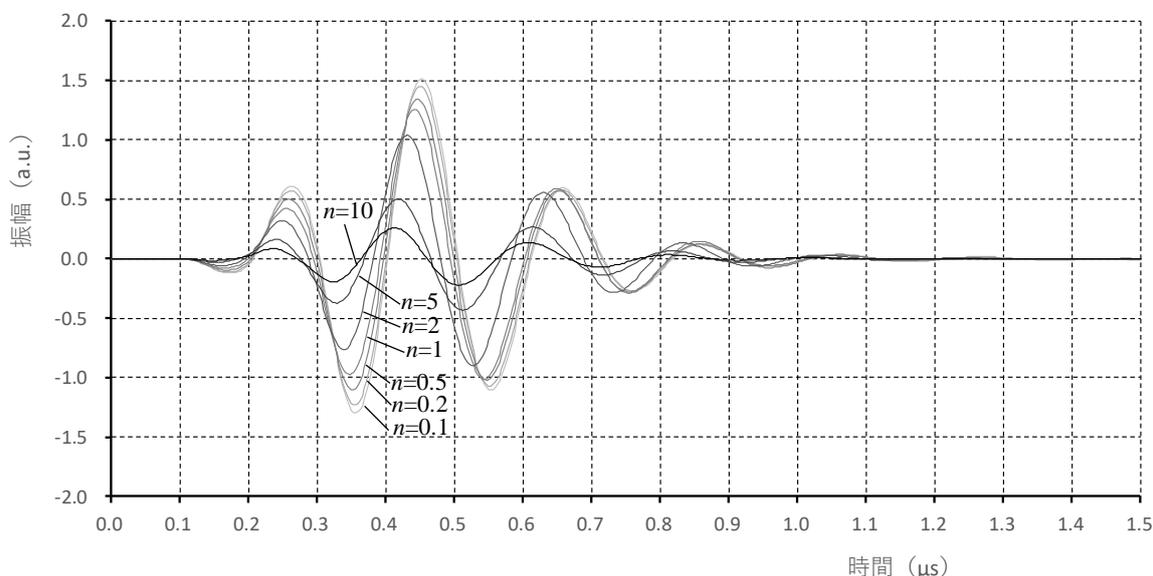


図 D.1—板厚が近距離音場限界距離の 0.1 倍～10 倍まで変化したときの B₁ エコーの計算例（円形振動子、振動子径：10 mm、周波数：5 MHz）

この結果、例えば板厚 21mm の鋼板の音速を B₁ エコーと B₂ エコーとの時間差を、パルスオーバーラップ法を用いて測定すると、B₂ エコーは板厚 42mm のときの B₁ エコーとほとんど等しいので、B₁ エコーの位

相シフトと B_2 エコーの位相シフトとの間に差 (以下、位相のずれ) が発生し、音速測定 of 誤差要因になる。板厚による位相シフトは、**図 D.1** の場合にはエコーの最初の部分では小さく、振幅が最大になる 2 サイクル目から大きくなる。この部分では、 n が 0.1~10 まで変化する間に、波形はおよそ 1/4 波長だけ移動する。**図 D.2** は、位相シフトを簡単に推定できるように、超音波を周波数が 5 MHz の連続的な正弦波に単純化したときの底面エコーの位相シフトを計算した結果である。位相の 90° の変化は 1/4 波長の位相シフトに対応している。

図 D.1 と **図 D.2** とを比べると、例えば板厚 42mm のときの **図 D.1** のプラス側のピーク位置での位相シフトは 2 サイクル目では 38° 、3 サイクル目では 51° で、**図 D.2** の $n=2$ のときの 48° (**図 D.2** の B_2) に近い。パルス波形と連続波との違いはあるが、**図 D.1** (パルス波形での計算結果) と **図 D.2** (連続波での計算結果) とは、定性的には全領域で一致し、基準化距離 n が 1 以上のときには、波形の後半では定量的にも一致している。

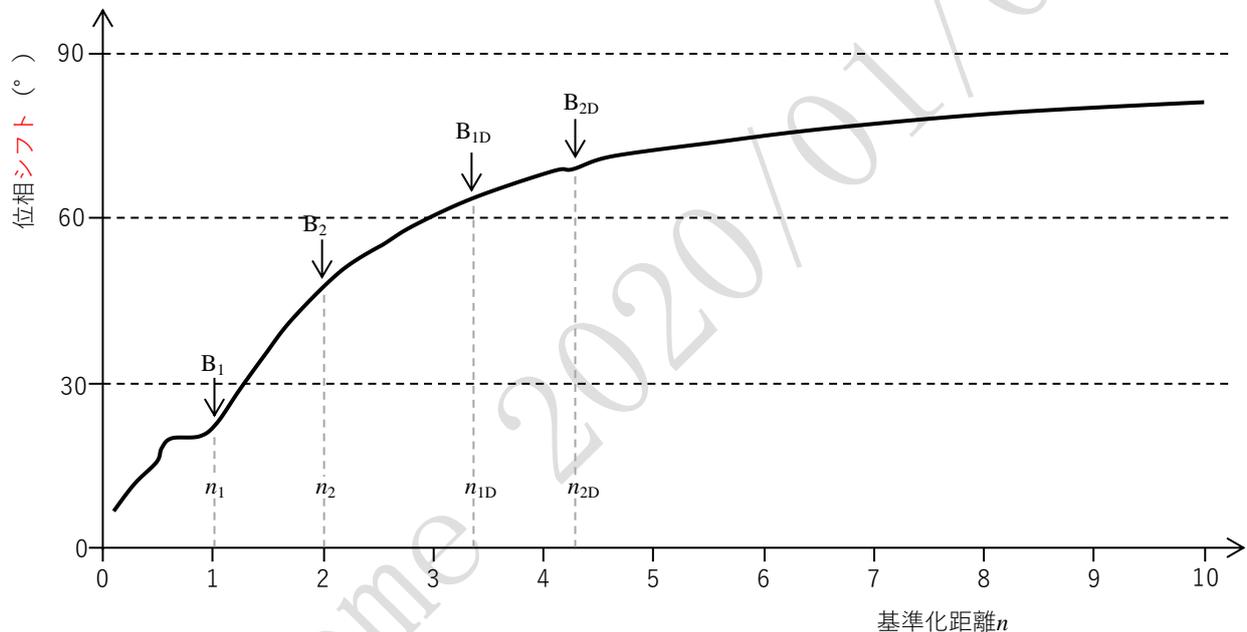


図 D.2—連続的な正弦波の場合の位相シフト

D.2 測定精度への影響

この現象による二つのエコーの位相ずれは、位相シフトを表す曲線の傾きが最も急な領域で、直接接触法による第 1 回底面エコー B_1 (基準化距離 n_1) 及び第 2 回底面エコー B_2 (基準化距離 n_2) の波形を重ねたときに特に大きい。例えば、厚さ t_s が 21 mm の鋼板について、周波数 5 MHz の超音波 (波長約 1.2 mm) を用い、 B_1 及び B_2 を利用して音速を測定する場合には、**図 D.2** によれば、基準化距離 n_1 と基準化距離 n_2 との間の位相のずれは約 25° である。長さに換算すると、およそ 0.08 mm になるので、このずれによる音速の誤差は、0.2% に達する。

パルスオーバーラップ法を用いた音速測定において、この現象の影響を避けるためには、近距離音場側か遠距離音場側のいずれかのエコーだけを使って音速測定を行うことが考えられる。遠距離音場のエコーを得るには、**図 D.3** のように試験体と探触子との間に厚い遅延体を挟む方法が有効とされている。遅延体に

は、光学ガラスなどの均一で減衰の少ない材料を選ぶ（実際にガラスの遅延体の付いた探触子もある。）。遅延体を利用すると、**図 D.2** のように遅延体がある場合の第 1 回底面エコー B_{1D} （基準化距離 n_{1D} ）と遅延体がある場合の第 2 回底面エコー B_{2D} （基準化距離 n_{2D} ）との関係のように、基準化距離が直接接触法の場合に比べて変化し、位相のずれが減る。基準化距離 n_{1D} 及び n_{2D} は式(D.1)及び式(D.2)によって計算できる。

$$n_{1D} = \frac{4(t_S \cdot \lambda + t_D \cdot \lambda_D)}{D^2} \dots\dots\dots(D.1)$$

$$n_{2D} = \frac{4(2 \cdot t_S \cdot \lambda + t_D \cdot \lambda_D)}{D^2} \dots\dots\dots(D.2)$$

ここに、

- λ : 試験体中の超音波の波長 (mm)
- λ_D : 遅延体中の超音波の波長 (mm)
- t_S : 試験体の厚さ (mm)
- t_D : 遅延体の厚さ (mm)
- D : 振動子の直径 (mm)

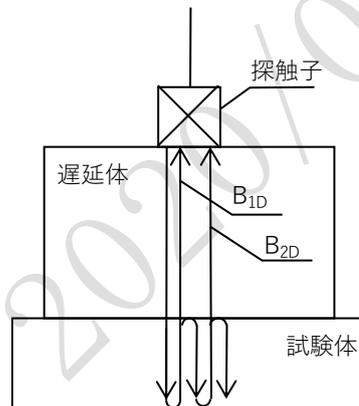


図 D.3—波形の変化を少なくする方法

図 D.4 は、探触子の周波数及び振動子直径を**図 D.1**と同じとして、試験体については、厚さ t_S : 20 mm、音速 : 5 920 m/s、密度 : $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とし、遅延体については、厚さ t_D : 50 mm、音速 : 5 980 m/s、密度 : $2.52 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ として計算した例である。 B_{1D} 及び B_{2D} は試験体の第 1 回及び第 2 回の底面エコー、 S_1 及び S_2 は遅延体と試験体との境界面からの第 1 回及び第 2 回の境界面エコーを表している。

式(D.1)及び式(D.2)によってこの例の場合の n_{1D} 及び n_{2D} を計算すると、次のとおりとなる。

$$\lambda = \frac{5920 \times 10^3}{5 \times 10^6} = 1.184 \text{ mm}$$

$$\lambda_D = \frac{5980 \times 10^3}{5 \times 10^6} = 1.196 \text{ mm}$$

$$D = 10 \text{ mm}$$

$$t_S = 20 \text{ mm}$$

$$t_D = 50 \text{ mm}$$

$$n_{1D} = \frac{4 \times (20 \times 1.184 + 50 \times 1.196)}{10^2} = 3.34$$

$$n_{2D} = \frac{4 \times (2 \times 20 \times 1.184 + 50 \times 1.196)}{10^2} = 4.29$$

このときの位相の変化は、約 6° となり、波形変形による誤差はおよそ 0.05% に低減される。

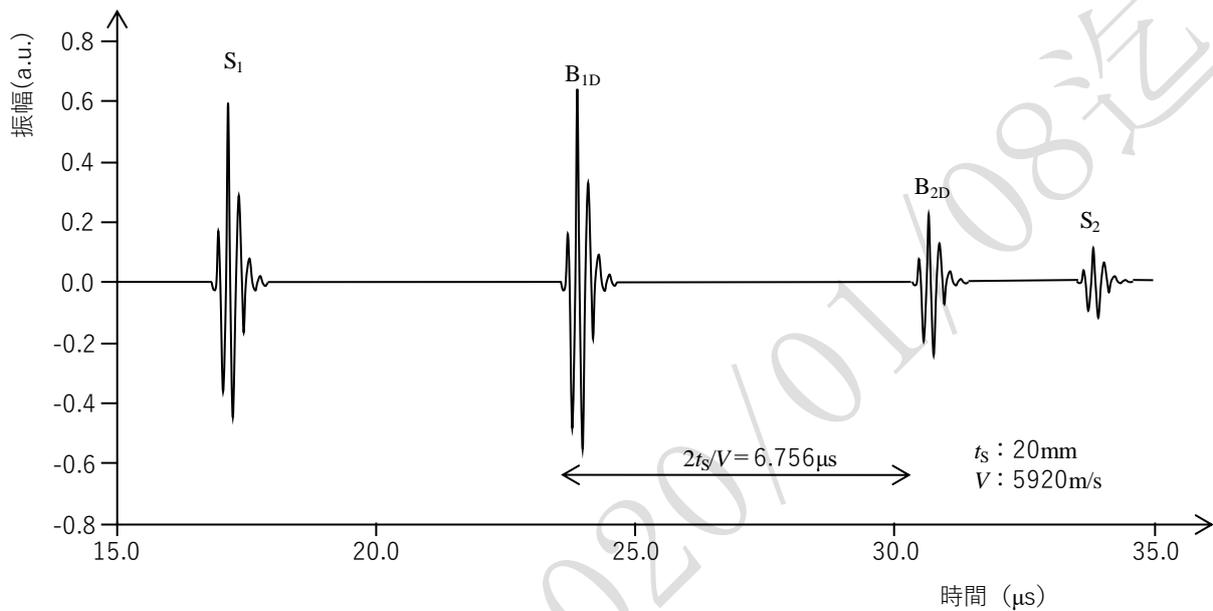


図 D.4—遅延体があるときの受信波形の計算例

JIS Z 2353 : 0000

超音波による固体の音速の測定方法

解説

この解説は、規格に規定・記載した事柄を説明するもので、規格の一部ではない。

この解説は、日本規格協会が編集・発行するものであり、これに関する問合せ先は日本規格協会である。

1 今回の改正までの経緯

この規格は、1991年に制定され、2003年（以下、旧規格という。）の改正を経て今回の改正に至った。今回の改正までの経緯は、次のとおりである。

- a) 信頼できる測定値を得るためには、試料の準備や測定法の選択を適切に行うことが重要で、音速が正確に知られている対比試験片を利用して測定装置を校正する方法は、測定方式や機材が異なる場合にも、一般的に必要とされる精度が得られる方法としての有効性が高い。工場などの現場で、個々の材料の音速を正確に測定する方法を規定することを目的にして、1991年に **JIS Z 2353** 超音波パルス法による固体の音速の測定方法（対比試験片を用いる方法）として制定された。
- b) 計測機器の技術進歩は著しく、アナログ探傷器では表示器の時間軸を目視で読み取っていたが、デジタル探傷器では、時間の計測法がまったく変わり、デジタル化された数値が表示されるようになり、探傷器の時間軸直線性という概念は、デジタル探傷器ではほとんど必要ではなくなった。この変化に対応すること及び使われなくなった方法、機材を削除し、精度を示す数値などを実現しやすい大きさに修正することを主として、2003年に規格が改正された。

今回、一般社団法人日本非破壊検査協会は、**JIS** 原案作成委員会を組織し、**JIS** 原案を作成した。

2 今回の改正の趣旨

従来は、固体音速は音速が既知の対比試験片を基準にして測定する必要があったが、その後の技術進歩に伴い、超音波探傷器などの装置の性能及び安定性が高まり、現在では対比試験片を用いなくても音速が測定可能となった。このように技術の進歩と旧規格との乖離が顕在化していたため、旧規格の改正が必須となっていた。

3 審議中に特に問題となった事項

デジタル探傷器に表示されるビーム路程を用いて音速測定を行う場合に、ビーム路程の表示方法が2種類（超音波が往復した距離＝音速×伝搬時間/2、超音波が片道伝搬した距離）あるため、どちらを用いるかによって、数式が異なる問題があった。このため、ビーム路程は超音波が往復した距離として定義した。

4 適用範囲について

この規格は、周波数1MHz以上の超音波法によって、固体の音速を測定する方法及び測定結果を表示する方法について規定しているが、コンクリート等の建設・建築系の材料は対象として想定していない。

5 主な改正点

この規格の主な改正点を、**解説表 1** に示す。

解説表 1—JIS Z 2353:2003 からの主な改正点

項目	旧規格	この規格
対比試験片	用いる。	測定機器が高精度化したため、用いない。
測定系の校正	対比試験片を用いて実施することが必須。	測定機器が高精度化したため、それぞれの機器の校正で可。
測定に用いる超音波の周波数	規定なし。	測定精度確保のため、1MHz 以上。
測定精度	規定なし。	高精度測定が可能な機器が出現したため、精度 1% を目安とする測定を普通精度の測定として分類し、精度 1% より高い精度を目指す測定を高精度の測定として分類。
音速測定機器	<ul style="list-style-type: none"> ・デジタル表示超音波厚さ計 ・アナログ超音波探傷器 ・デジタル超音波探傷器 ・シングア라운드測定装置 (対比試験片の音速を測定する場合) 	<p>高精度の測定機器として○印に示すものが普及した。また、測定機器個々の性能が向上した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○パルサーレーザシステム ・デジタル探傷器 ・超音波厚さ計 ・音速計 ○シングア라운드測定装置 ○電磁超音波共鳴装置
伝搬時間測定方法	<ul style="list-style-type: none"> ・パルスオーバーラップ法 (対比試験片の音速を測定する場合) ・ゼロクロス法 (対比試験片の音速を測定する場合) 	<p>デジタル技術の進歩に伴い、伝搬時間測定法も次の多様な方法を利用できるようになった。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ピークポイント法 ・スライスレベル法 ・ゼロクロス法 ・パルスオーバーラップ法
伝搬時間測定法についての注意及び適用例	規定なし。	パルスオーバーラップ法についての注意及び適用例を 附属書 D に示した。

6 原案作成委員会の構成表

原案作成委員会の構成表を、次に示す。

JIS Z 2353（超音波による固体の音速の測定方法）原案作成委員会 構成表

	氏名	所属
(委員長)	○ 廣瀬 壮一	東京工業大学
(幹事)	○ 山田 尚雄	元神奈川県工業試験所
	○ 高田 一	JFE テクノリサーチ株式会社
(委員)	大今 宏史	経済産業省 製造産業局
	橋森 武志	経済産業省 製造産業局
	大岡 紀一	一般社団法人日本非破壊検査協会
	大谷 俊博	湘南工科大学
	田中 洋次	一般社団法人日本検査機器工業会
	古田 豊	一般財団法人日本規格協会
	福原 熙明	FUT 研究所
	榎田 靖夫	JFE アドバンテック株式会社
	○ 秋山 正彦	東京計器株式会社
	○ 大橋 利明	菱電湘南エレクトロニクス株式会社
	○ 斉藤 順次	日本電磁測器株式会社
	○ 高橋 忠良	超音波工業株式会社
	○ 小林 栄男	株式会社検査技術研究所
	○ 笹原 利彦	株式会社 NDI リサーチ
	原田 浩幸	株式会社ニチゾウテック
	福田 眞一	日鉄住金テクノロジー株式会社
	松原 重行	非破壊検査株式会社
	森 大輔	大同特殊鋼株式会社
	山路 鉄生	一般社団法人日本鋳鍛鋼会（神鋼検査サービス株式会社）
(関係者)	鳩村 和樹	経済産業省 産業技術環境局（2019年7月まで）
	渡辺 眞和	経済産業省 産業技術環境局（2019年7月から）
(事務局)	山口 光輝	一般社団法人日本非破壊検査協会

注記 ○印は、分科会委員を示す。

（執筆者 廣瀬 壮一，高田 一）