固体中の超音波パルス伝ば時間を求める 各種デジタル測定法の比較*

川 嶋 紘 一 郎^{*1}, 藤 井 郁 也^{*2}

Comparison among Several Digital Methods of Measuring Time-of-Flight of Ultrasonic Waves in Solids

Koichiro KAWASHIMA and Ikuya FUJII

A digital measurement system for the time-of-flight of ultrasonic longitudinal and transverse waves is constructed in terms of a conventional pulser/receiver, a transducer and a high-speed digital wave memory for material characterization and acoustoelastic stress measurement of solid materials with weak dispersion. Three methods, zero-crossing, cross-correlation and phase spectral methods, are compared from the viewpoint of precision for the time-of-flight measurement. The measurements of aluminum (10 mm in thickness) and acrylic (5 mm) plates have shown that the precision (2σ) of the time-of-flight is estimated to be less than 0.01 ns by the cross-correlation methods, which corresponds to the relative velocity variation of 2×10^{-6} for the longitudinal velocity of the aluminum plate. The cross-correlation method is found to have the highest stability.

Key Words: Material Testing, Experimental Stress Analysis, Ultrasonic Velocity, Computer-Aided Measurement, Zero-Crossing, Cross-Correlation, Phase Spectrum

1. 緒 言

近年, 超音波を利用した各種複合材料・不均質材料の非破壊的特性評価, 音弾性法を用いた応力測定などの研究が進められ, 前者では超音波伝ば速度, 減衰率が, 後者では伝ば速度がおもに評価に利用されている。これまで, 超音波伝ば速度, 多くの場合伝ば時間の高精度測定には, おもに, シングア라운드法あるいはパルスエコーオーバーラップ法など⁽¹⁾⁽²⁾のアナログ手法が用いられ, また減衰率の測定にはエコー列のピーク値またはエコー波形のパワースペクトルが用いられている。

これに対し, 高速 A/D 変換・大記憶容量のデジタル波形記憶装置を利用して高精度の伝ば時間の測定が可能となれば, 記録した超音波反射あるいは透過波形に種々の信号処理を行い, 速度・減衰率・分散など多様な特性を評価することにより, 材料の内部構造の多面的診断ができるものと期待される。しかし, 波形記憶装置内蔵の時間差測定機能を用いるときには 0.1% 以上の時間精度を期待できないため, 少数の例^{(3)~(6)}を

除いて高精度の伝ば時間測定にはアナログ法の使用が一般的である⁽⁷⁾。

著者らは, 市販の超音波パルス送受信機, 探触子, デジタル波形記憶装置とパーソナルコンピュータを組合せて, 固体内の超音波伝ば時間のデジタル測定の精密度の向上を試み, 前報⁽⁸⁾⁽⁹⁾ではデジタル波形記憶装置に記録した試験片裏面からの第 1 および第 2 エコーにゼロクロス法を適用し, 超音波探触子の付替えの影響を除けば, 垂直入射超音波横波の伝ば時間を 2×10^{-5} の相対誤差内で測定できることを示した。

本報では, 離散化したエコー波形列に対して相互相関法⁽⁴⁾, 位相スペクトル法⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾を適用しデジタル的に伝ば時間を算出することを試み, 比較的分散が少ないアルミニウムおよびアクリル板の縦波と横波の伝ば時間を測定し, これらの方法およびゼロクロス法による測定値の精密度が, 位相スペクトル法による群速度の測定値を除いて, シングア라운드法・パルスエコーオーバーラップ法と同程度以上であることを明らかにした。さらにこれらの各方法の特性および精密度についても検討した。

2. 伝ば時間のデジタル測定法

2.1 測定システム 使用した測定システムの概

* 原稿受付 平成 5 年 2 月 23 日。

*¹ 正員, 名古屋工業大学 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

*² 准員, 名古屋工業大学大学院。

略を図1に示す。超音波パルス送受信機(Panametrics 5052 PR), 広帯域垂直入射縦波探触子(10 MHz, 1/4" Ultrasonic LC 25-10)または横波探触子(5 MHz, 1/4" Panametrics V 156)を用いて, 試験片裏面からの最初の数エコーの波形を分解能8ビット, 最小サンプリング間隔10 ns(等価サンプリングでは1.25 ns)のA/D変換ボード(ソニックス STR 8100)を介してパーソナルコンピュータに記憶する。この際, 256個の波形を加算することにより, S/N比を向上させるとともに垂直分解能を高める。この波形に対して以下に示す各種方法に基づく波形処理を行い, 伝ば時間を求める。

2.2 時間差測定法

(A) ゼロクロス法 図2に示すように, 各エコーの対応する部分の0[V]線との交点の時刻を求め, それらの差を伝ば時間とする。この際には1.25 nsごとに波形をA/D変換し, 上記交点前後の数点を線形近似して, 交点の時刻の測定精度を高めた。

(B) 相互相関法⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 図3に示すようにあるエコー $x(t)$ と他のエコー $y(t)$ に関して定義される相互相関関数

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t+\tau)dt \quad (1)$$

が最大となる τ を求める。分散がなくエコー間の減衰 α の固体についてエコー y の x に対する遅れ時間(伝ば時間)が T のとき

$$y(t) = \pm \alpha x(t - T) \quad (2)$$

と表される。

離散系での相互相関関数を次式で定義し, その最大値を与える k を求める。

$$R_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-k-1} x(n)y(n+k) \quad (3)$$

ここで, k の値をサンプリング間隔以下まで求めるため, 上式を最大とする k の両側の点を含む3点により2次関数で R_{xy} を近似し, その極値を与える k_m を用いる。

(C) 位相スペクトル法⁽¹⁰⁾ 分散性を有する固体中では位相速度は周波数に依存するので, 上記2方法を用いることは適当でない。この場合には以下のように, 位相スペクトルを用いて参照波と対象とするエコーの特定周波数での位相差あるいは周波数に対する位相角の導関数を求めることにより, 位相速度と群速度が求められる。

X 軸上を伝ばする平面超音波パルスの変位

$$u(x, t) = u(0, t)e^{-\alpha x}e^{-i\beta x} \quad (4)$$

のフーリエ変換は次式で表される。

$$U(x, \omega) = U(0, \omega)e^{-\alpha x}e^{-i\beta x} \quad (5)$$

ここで, β は波数,

$$U(0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(0, t)e^{-i\omega t}dt \\ = |U(0, \omega)|e^{i\phi_0(\omega)} \quad (6)$$

である。

$x=L$ でのフーリエ変換は同様に

$$U(L, \omega) = U(0, \omega)e^{-\alpha L}e^{-i\beta L} \quad (7)$$

と表され, 距離 L の伝ばによる位相差は

$$\Delta\phi(\omega) = \phi(\omega) - \phi_0(\omega) = -\beta L \quad (8)$$

となり, これを用いて位相速度と群速度は次式で表される。

$$V_p(\omega) = \frac{\omega}{\beta} = -\frac{\omega L}{\Delta\phi(\omega)} \quad (9)$$

図1 デジタル伝ば時間測定システム

図3 エコー列の分離

図2 ゼロクロス法

図4 エコーの切出し法

表 1 アルミニウム合金中の縦波の伝ば時間と速度

	No	Zero-crossing	Cross-correlation	Phase spectrum	
				Phase velocity	Group velocity
Time (ns)	1	3168.490	3167.789	3167.406	3176.198
	2	3168.492	3167.789	3167.410	3176.204
	3	3168.491	3167.790	3167.409	3176.185
	4	3168.493	3167.790	3167.409	3176.202
	5	3168.490	3167.789	3167.408	3176.197
	6	3168.497	3167.788	3167.409	3176.180
	7	3168.490	3167.788	3167.407	3176.189
	8	3168.489	3167.785	3167.405	3176.183
	9	3168.490	3167.786	3167.405	3176.197
	10	3168.495	3167.790	3167.410	3176.188
	Av.	3168.4917	3167.7884	3167.4078	3176.1923
	2σ	0.006	0.004	0.004	0.018
Veloc- ity (m/s)	1	6344.98	6346.38	6347.15	6329.58
	2	6344.97	6346.38	6347.14	6329.57
	3	6344.98	6346.38	6347.14	6329.61
	4	6344.97	6346.38	6347.14	6329.57
	5	6344.98	6346.38	6347.15	6329.58
	6	6344.96	6346.38	6347.14	6329.62
	7	6344.98	6346.38	6347.15	6329.60
	8	6344.98	6346.39	6347.15	6329.61
	9	6344.98	6346.39	6347.15	6329.58
	10	6344.97	6346.38	6347.14	6329.60
	Av.	6344.975	6346.382	6347.145	6329.592

$$V_g(\omega) = \frac{d\omega}{d\beta} = -L \left(\frac{d}{d\omega} \Delta\phi(\omega) \right)^{-1} \dots\dots\dots (10)$$

離散系では、離散フーリエ変換で得られる実数部 $\text{Re}(n)$ と虚数部 $\text{Im}(n)$ を用いて、位相スペクトル $\phi(n)$ が計算される。

$$\phi(n) = \tan^{-1} \{ \text{Im}(n) / \text{Re}(n) \} \dots\dots\dots (11)$$

式(8)に対する離散位相差 $\Delta\phi(n)$ を用いて、位相速度と群速度が得られる。

$$V_p = L / \left[-\frac{\Delta\phi(n)}{\omega(n)} + W \right] \dots\dots\dots (12)$$

$$V_g(n) = L / \left[-\frac{\Delta\phi(n+1) - \Delta\phi(n-1)}{2\Delta\omega} + W \right] \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 W は図 4 に示す二つのウィンドウの時間差であり、群速度については微分を中心差分で近似した。

離散フーリエ変換では、周波数分解能を高めるため、切り取ったエコー波形の右側に 0 を追加して 8192 点のデータに対して FFT 計算を行った。式(11)で得られる ϕ の値は $-\pi$ から π の範囲であるので、位相に不連続が生じた場合、連続となるように 2π を差引いた。

3. 測定結果

3・1 縦波 測定はアルミニウム合金 2017-T 3 板(厚さ 10.052 mm)およびアクリル板(5.021 mm)について行った。探触子と試験片の間には縦波用音響結合剤(低粘度グリセリン)を用い、ばねを利用して一定力(約 20 N)で探触子を試験片に押付けた。アルミニウ

(a) ゼロクロス法

(b) 相互相関法

図 5 エコー波形の重ね合わせ(アルミニウム合金：縦波)

ムの測定では、探触子前面板と試験片の間の音響結合剤内での多重反射の影響を少なくするため、厚さ 5 mm のアクリル板をはさんだ。伝ば時間に及ぼす温度の影響を可能な限り少なくするため、音響結合剤の周囲を粘土で覆い試験片を水槽内に入れ、水温を $20 \pm 0.02^\circ\text{C}$ 以内に制御した。また空気中での測定と同一条件とするため、試験片裏面にビニールシートで空間を設けた。試験片を水中に浸し 10 分以上経過後に測定

表 2 アクリル中の縦波の伝ば時間と速度

	No.	Zero-crossing	Cross correlation	Phase spectrum	
				Phase velocity	Group velocity
Time (ns)	1	3673.838	3666.679	3670.461	3647.502
	2	3673.837	3666.674	3670.461	3647.499
	3	3673.835	3666.670	3670.451	3647.504
	4	3673.825	3666.657	3670.442	3647.467
	5	3673.829	3666.654	3670.434	3647.478
	6	3673.818	3666.641	3670.417	3647.430
	7	3673.813	3666.634	3670.417	3647.444
	8	3673.803	3666.620	3670.401	3647.432
	9	3673.798	3666.606	3670.390	3647.410
	10	3673.809	3666.597	3670.377	3647.442
	Av.	3673.8205	3666.6432	3670.4251	3647.460
Velocity (m/s)	1	2733.38	2738.72	2735.90	2753.12
	2	2733.38	2738.72	2735.90	2753.12
	3	2733.38	2738.72	2735.90	2753.12
	4	2733.39	2738.73	2735.91	2753.14
	5	2733.39	2738.74	2735.92	2753.14
	6	2733.40	2738.75	2735.93	2753.17
	7	2733.40	2738.75	2735.93	2753.16
	8	2733.41	2738.76	2735.94	2753.17
	9	2733.41	2738.77	2735.95	2753.19
	10	2733.40	2738.78	2735.96	2753.16
	Av.	2733.394	2738.744	2735.924	2753.149

を行った。

表 1 には各方法により求められたアルミニウム合金試験片を一往復する縦波の伝ば時間およびそれより算出される速度を示す。一例として、対象とした 2 個のエコーの重ね合わせの状況を図 5 に示す。位相スペクトル法による位相速度および群速度と対応する伝ば時間は振幅スペクトルが最大となる 8.6 MHz における値である。

測定の精密さを知るため、表には連続する各 10 回の結果を表示した。伝ば時間の精密度 (95%信頼度) は、相互相関法と位相速度に対するスペクトル法で 0.004 ns、ゼロクロス法で 0.006 ns、群速度についての位相スペクトル法で 0.018 ns であり、相互相関法による対応する音速の相対変動率は 1×10^{-6} 以下である。群速度に関する位相スペクトル法の精密度が低下する原因として、位相スペクトルの周波数に対する微分を差分近似する際の誤差が考えられる。一方、各方法で得られた音速値の間には、同一のエコー波形を用いているにもかかわらず、群速度を除いて、数 m/s の違いが生ずる。これは各方法により伝ば時間測定に用いる波形の部分および特徴が異なるためである。

表 2 にはアクリル材に対する結果を示す。位相スペクトル法による値は、図 6 に示すように第 1 および第 2 エコーの振幅スペクトルが最大となる周波数の中間値 7.5 MHz におけるものである。

測定回数の増大に伴い表の伝ば時間はほぼ単調に減少し、対応して速度は増加している。別の実験より、このアクリル板内の超音波伝ば時間が 1°C 当たり 8.5 ns (0.01°C につき 0.085 ns) だけ変化することが確かめら

図 6 振幅および位相スペクトル (アクリル：縦波)

れており、相互相関法の時間変動幅は 0.01°C の温度変化とほぼ対応する。この理由により伝ば時間の精密度を記入しなかったが、測定回数 (測定中の経過時間) に対して伝ば時間を線形近似し、その回帰直線よりの変動を求めれば、アルミニウムの場合と同程度の精密度であることが確かめられる。この場合も群速度を除いて、用いる方法により 5 m/s 程度の速度差が見られ

る。

3・2 横波 垂直入射波の伝ば時間測定では、横波用音響結合剤(Panametrics SWC)を用いた。この結合剤の厚さの減少を制御するため、入手の容易な市販の厚み 0.05 mm のセロファンテープを試験片と探触子の間に 6 mm の間隔をおいて貼り付けた。テープを使用せず結合剤の厚さを最小とした場合に比較して、アルミニウム合金では伝ば時間が約 10 ns 増大(音速で 5 m/s 程度の低下)した。さらに探触子と試験片の接触部の周りを粘土で覆い測定中の結合剤の乾燥あるいは吸湿を防ぎ、縦波の測定と同様な温度制御のもとで測定を行った。この場合には、探触子を試験片に押付けてから 10 分経過後に水槽に浸し、10 分後に測定を行った。

表 3 にアルミニウムの圧延方向に振動する横波の測定結果を示す。なお、使用した横波用探触子では探触子内部での超音波の減衰が不十分なため、位相スペクトルを用いた評価を行わなかった。

相互相関法の伝ば時間欄(10 分および 30 分)より、測定回数の増大に伴い伝ば時間が減少する傾向がみられるが、これは音響結合剤の厚みのわずかな減少によるものである。温度が安定した 20 分後の相互相関法による測定の精密度は 0.002 ns であり、極めてばらつきの少ない測定値が得られた。

4. 検 討

4・1 測定の精密度 前述のように本システムを用いた伝ば時間のデジタル測定の精密度(95%信頼度)は、厚さ 10 mm のアルミニウム板中の縦波につい

ては、相互相関法と位相速度に対する位相スペクトル法では 0.004 ns、デジタルゼロクロス法で 0.006 ns、群速度を求める位相スペクトル法では 0.02 ns であり、また横波では相互相関法で 0.01 ns、ゼロクロス法で 0.02 ns であり、これらの値は複屈折音弾性解析においてシングア라운드法で得られている値⁽¹¹⁾⁽¹²⁾と同程度以上である。

4・2 方法による音速の差異 同一のエコー波形に対して異なる手法を適用すると、アルミニウムの縦波についてゼロクロス、相互相関、位相速度に対するスペクトル法の間では、2 m/s の速度の差が(相対誤差で 3.5×10^{-4})、それらと群速度の間では 17 m/s の差(相対誤差 2.7×10^{-3})が生じている。アクリルについては、前者間で 5 m/s (2×10^{-3})、後者間では 20 m/s (7.3×10^{-3})の差異がある。図 5 (a)に示すように、ゼロクロス法では各エコー波形の 1 点(図では第 1 ゼロクロス点)のみを評価の対象とするが、相互相関法では問題とする 2 個のエコー波形全体を考慮するので、波形に含まれるノイズの影響を受けにくいため最も安定した測定結果が得られる。これに対し、群速度を求める位相スペクトル法は周波数に対する位相角の導関数を用いるので、図 6 (b)のような場合差分近似による誤差が生ずる。結論として、相互相関法はアナログ手法のパルスエコーオーバーラップ法のデジタル形式と考えられるので、この方法を用いるのが適当であると考えられる。

なお、試験片の厚さに依存して音場分布が変化することによる音速変化が考えられるので、今後これに関する検討が必要である。

表 3 アルミニウム合金中の横波の伝ば時間と速度

	No.	Zero-crossing			Cross correlation		
		10 min.	20 min.	30 min.	10 min.	20 min.	30 min.
Time (ns)	1	6382.224	6382.168	6382.060	6381.486	6381.458	6381.388
	2	6382.205	6382.173	6382.045	6381.486	6381.457	6381.389
	3	6382.219	6382.175	6382.044	6381.483	6381.458	6381.387
	4	6382.206	6382.164	6382.046	6381.482	6381.457	6381.385
	5	6382.208	6382.170	6382.052	6381.483	6381.457	6381.384
	6	6382.202	6382.182	6382.048	6381.483	6381.458	6381.385
	7	6382.201	6382.172	6382.053	6381.478	6381.459	6381.381
	8	6382.206	6382.169	6382.045	6381.477	6381.459	6381.381
	9	6382.194	6382.169	6382.050	6381.475	6381.459	6381.380
	10	6382.200	6382.169	6382.057	6381.474	6381.457	6381.380
	Av.	6382.2065	6382.1711	6382.052	6381.4807	6381.4579	6381.3840
	2σ	0.020	0.011	0.012	0.009	0.002	0.008
Velocity (m/s)	1	3150.00	3150.03	3150.08	3150.36	3150.38	3150.41
	2	3150.01	3150.02	3150.09	3150.36	3150.38	3150.41
	3	3150.00	3150.02	3150.09	3150.36	3150.38	3150.41
	4	3150.01	3150.03	3150.09	3150.37	3150.38	3150.41
	5	3150.01	3150.03	3150.08	3150.36	3150.38	3150.41
	6	3150.01	3150.02	3150.09	3150.36	3150.38	3150.41
	7	3150.01	3150.02	3150.08	3150.37	3150.38	3150.42
	8	3150.00	3150.03	3150.09	3150.37	3150.38	3150.42
	9	3150.01	3150.03	3150.08	3150.37	3150.38	3150.42
	10	3150.01	3150.03	3150.08	3150.37	3150.38	3150.42
	Av.	3150.007	3150.026	3150.085	3150.365	3150.38	3150.414

4・3 デジタル手法を用いる利点 4・2節で述べたように本方法による伝ば時間の測定の精密度はシングア라운드法と同程度以上である。デジタル手法では波形の加算回数を増すことにより S/N 比を改善することが容易であり、さらにエコー波形に各種のデジタル処理を施すことにより、減衰率、分散特性などを同一の波形データを用いて評価することができるので、超音波を用いた非破壊材料特性評価にはデジタル手法が有益であると考えられる。

5. 結 言

市販の超音波送受信機、デジタル波形記憶装置、パーソナルコンピュータを組合せ、分散性の弱い固体内を伝ばする超音波パルスの伝ば時間をデジタル的に高精度で測定できるシステムを構成し、温度変化を 0.02°C 以内に制御して、ゼロクロス法、相互相関法、位相スペクトル法によりアルミニウム合金板(厚さ 10 mm)およびアクリル板(5 mm)の垂直入射縦波と横波の伝ば時間を測定し、上記各方法の精密度、特徴について検討した。その結果以下の点が明らかとなった。

(1) サンプリング速度 800 MHz, 分解能 8 ビットの A/D 変換ボードを用いて、256 個の波形を加算して S/N 比を向上させた波形に対して上記の方法を適用することにより、探触子の着脱を伴わない縦波の測定では、ゼロクロス法、相互相関法では 0.006 ns 以内の精密度で伝ば時間が求められる。

(2) 最も精密度が高く安定性のある測定法は相互相関法である。エコー波形のノイズが少ない場合、ゼ

ロクロス法、位相速度に関するスペクトル法でも良好な測定値が得られる。

(3) 位相スペクトルを利用して群速度を求める方法では、周波数に対する位相角の導関数を中心差分を用いて近似したため、上記 2 方法より若干精密度が低下する。

(4) 伝ば時間(音速)の変化率を測定する場合には、群速度に対応する位相スペクトル法を除いて、デジタル手法を用いてもパルス波を用いるアナログ手法と同程度以上の精密さが実現できる。

最後に本測定システムを構成するに際して有益な助言をいただいた、立命館大学・岩清水幸夫教授、京都大学・松本英治助教授ならびに(株)ソニックスの各位に謝意を表する。

文 献

- (1) Papadakis, E. P., *Phys. Acoust.*, XII (1976), 277.
- (2) Pao, Y. H., Sachse, W. and Fukuoka, H., *Phys. Acoust.*, XVII (1984), 61.
- (3) 村尾・岩清水, 材料, 34-387 (1985), 1472.
- (4) Hull, D. R., Kautz, H. E. and Vary, A., *Mater. Eval.*, 43-10 (1985), 1455.
- (5) Kline, R. A. and Egle, D. M., *NDT Int.*, 19 (1986), 341.
- (6) 村上・ほか 4 名, 機論, 55-512, A (1989), 910.
- (7) 日本工業規格 Z 2351-1991.
- (8) 川嶋・ほか 3 名, 材料, 41-464 (1992), 765.
- (9) Fujii, I., ほか 3 名, *Proc. NDT & SSM, FENDT'* 92, (1992), 319.
- (10) Sachse, W. and Pao, Y. H., *J. Appl. phys.*, 49-8 (1978), 4320.
- (11) 福岡・ほか 4 名, 機論, 50-453, A (1984), 945.
- (12) 小堀・岩清水, 機論, 54-498, A (1988), 245.