

論文 タイムストレッチトパルス法を利用した非接触非破壊検査

大嶋 康敬^{*1}・鳥越 一平^{*2}・末富 直樹^{*3}・森 和也^{*4}

要旨：本論文では、衝撃弾性波法におけるパルス状加振力として、タイムストレッチトパルスを適用した。この方法の利点は、(1)大きなパワーを持つ鋭いパルスを、低出力のパワーアンプを用いて生成することが可能である、(2)検査対象物にダメージを与えないことである。タイムストレッチトパルスを音波として放射し、円孔を有する木板の表面にステンレスシートを貼った試験片、および人工欠陥を有するコンクリート片の非接触非破壊検査を行った。計測した結果に固有振動数が明確にあらわれ、試験片の欠陥を検出することができた。

キーワード：タイムストレッチトパルス、非接触検査、非破壊検査

1. はじめに^{1), 2)}

構造物や機械の簡単な非破壊検査法として、近年、衝撃弾性波法が普及しつつある。衝撃弾性波法をコンクリート内部の空洞検出を例に簡単に示すと以下の通りである。コンクリート表面にハンマーなどで衝撃を与え縦波振動を励起する。欠陥があると伝播する縦波の一部が反射し、再度壁面を振動させる。壁面の振動を計測して欠陥の有無を判断する。欠陥の壁面からの深さは、衝撃により伝播した縦波が、欠陥で反射し壁面を振動させる時間間隔に比例する。欠陥が浅い場合は、衝撃によって空洞と試験片表面間の部分にたわみ振動を起こさせ、その振動を計測して欠陥の有無を判断することもある。一般的にたわみ振動の方が縦振動に比べて、周波数は低く、振幅は大きくなる。

一方、衝撃弾性波法における加振をパルス状の音響に置き換える方法が提案されている。この方法は、非接触にて非破壊検査を行うことができるものである。しかしながら、大きなパワーを持つ鋭いパルスを発生させることは技術的・コスト的に簡単ではない。

そこで、本報告では信号処理によって等価的に鋭いパルス信号を発生するタイムストレッチトパルス法を利用することによって、低い音圧レベルで等価的に大きなパワーを持つ鋭い音響パルスを発生させ、非破壊検査に適用する。本論文では、円孔を有する木板の表面にステンレスシートを貼った試験片を用いて、本方法の有効性を確認した。また、人工欠陥を埋め込んだコンクリート試験片に対しても本方法を適用した。

2. タイムストレッチトパルス法^{3), 4), 5), 6)}

一般に音響系のインパルス応答は、ダイナミックレンジが広く応答が長い。このような系の測定においては、外乱となるノイズも多く存在する。持続時間の短いパルス波を用いた測定では、十分な S/N 比を得るためには非現実的なパワーを持つパルス波、または多数回の同期加算が必要となる。そこで、短時間に安定したインパルス応答計測を行う方法として、タイムストレッチトパルス法が用いられている。

タイムストレッチトパルス法は、パルスを時

*1 熊本大学 工学部技術部 (正会員)

*2 熊本大学 工学部知能生産システム工学科 助教授 工博

*3 熊本大学 大学院自然科学研究科

*4 熊本大学 工学部知能生産システム工学科 教授 工博 (正会員)

間軸上に分散させる手法である。そのためエネルギーが短い時間に集中することがない。ストレッチされた信号の位相は、周波数の 2 乗に比例して変化させる。

時間シフト量 $\tau(f)$ は周波数に比例させるため、周波数を f 、定数を τ_0 とすると、式(1)のように表すことができる。

$$\tau(f) = \tau_0 f \quad (1)$$

時間領域での時間シフトは、周波数領域での位相シフトと等しい。この関係より、 δ 関数を位相シフトすると、 δ 関数の周波数特性は 1 であるため、角周波数を ω とおくと、式(2)が成り立つ。

$$e^{j\omega\tau} = e^{j2\pi\tau_0 f^2} \quad (2)$$

今回は、式(2)で定義される信号に $\tau_0 = 2m$ 、 $f = n/N$ を代入し、時間領域で実関数は周波数領域では複素共役が成り立つため式(3)で定義される信号を用いた。ここで N はサンプル数で 2 の乗数、 n は離散周波数、 $TSP(n)$ はタイムストレッチトパルスのスペクトル、 a_0 は離散周波数 n での絶対値、 m はタイムストレッチトパルスの幅を決定するパラメータである。

$$\begin{aligned} TSP(n) &= a_0 \exp(j4m\pi n^2 / N^2) \\ &\text{for } 0 \leq n \leq N/2 \\ TSP(n) &= TSP^*(N - n) \\ &\text{for } N/2 + 1 \leq n < N \end{aligned} \quad (3)$$

この信号は周波数領域のため、逆フーリエ変換すれば時間関数である信号が得られる。時間領域における実際のタイムストレッチトパルスを図-1 に示す。

時間領域でのタイムストレッチトパルスを $tsp(t)$ 、出力して得た応答を $y(t)$ 、被測定系の応答を $s(t)$ 、畳み込み演算を $*$ とすると式(4)が成り立つ。

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} tsp(\tau) s(t - \tau) d\tau &= y(t) \\ tsp(t) * s(t) &= y(t) \end{aligned} \quad (4)$$

畳み込み演算は結合律、交換律が成り立つため、時間関数 $\alpha(t)$ を用いると、式(4)は式(5)となる。

$$tsp(t) * \alpha(t) * s(t) = y(t) * \alpha(t) \quad (5)$$

よって、式(6)となるような $\alpha(t)$ との畳み込み演算を行うことによって、引き伸ばされたタイムストレッチトパルスを圧縮して δ 関数に戻すことになる。

$$tsp(t) * \alpha(t) = \delta(t) \quad (6)$$

時間領域での畳み込み演算は周波数領域での積に等しいという関係より、周波数領域での $\alpha(t)$ を $A(n)$ とすると、式(7)が成立する。

$$\begin{aligned} TSP(n) \times A(n) &= 1 \\ A(n) &= 1/TSP(n) \end{aligned} \quad (7)$$

よって、周波数領域でタイムストレッチトパルスの逆数となるような信号を用いることでインパルス応答を求めることができる。

そこで、タイムストレッチトパルス信号を出力して得た応答に式(8)で定義される $TSP(n)$ の逆関数 $ITPS(n)$ を逆フーリエ変換したものと畳み込み演算を行うことにより、圧縮されてインパルス応答を求めることができる。タイムストレッチトパルスを図-2 に示す。

$$\begin{aligned} ITPS(n) &= 1/a_0 \exp(-j4m\pi n^2 / N^2) \\ &\text{for } 0 \leq n \leq N/2 \\ ITPS(n) &= ITPS^*(N - n) \\ &\text{for } N/2 + 1 \leq n < N \end{aligned} \quad (8)$$

式(3)で生成したタイムストレッチトパルスを式(8)で生成した逆タイムストレッチトパルスとの畳み込み演算を行うことによって、パルス信号へと復元するシミュレーションを行った結果を図-3 に示す。

実際の計測では、計測された信号をこのような処理によってパルス信号へと復元し、その応答を見る。

コンピュータ上で $N=4096$ 、 $n=1200$ として生成したタイムストレッチトパルス信号を、出力サンプリングレート 10kHz で出力したと仮定し、FFT を行った周波数特性を図-4 に示す。図-4 より出力サンプリングレートの 1/2 の周波数までフラットな特性をもつことが分かる。

理論的には、上で述べた周波数成分が含まれるが、実際には、その信号を発生するシステム

の周波数特性にも依存することをわすれてはならない。

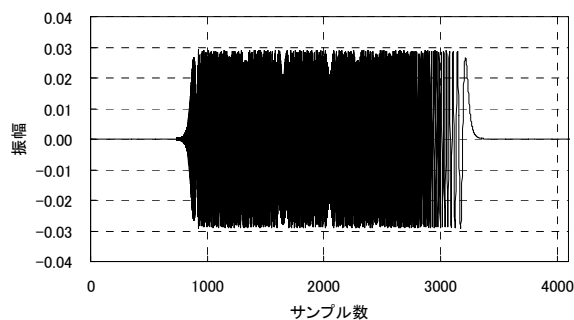


図-1 タイムストレッチトパルス

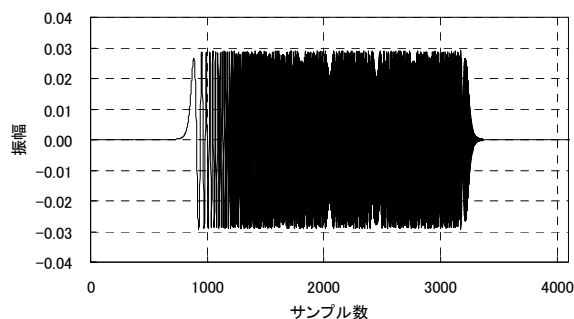


図-2 逆タイムストレッチトパルス

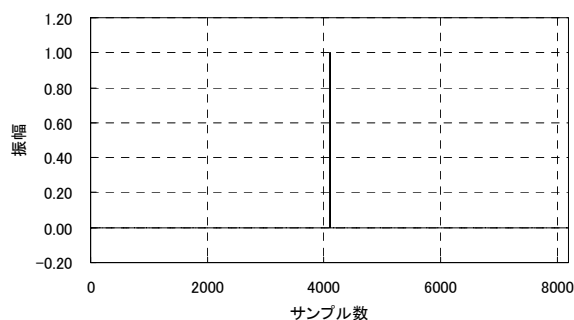


図-3 復元パルス

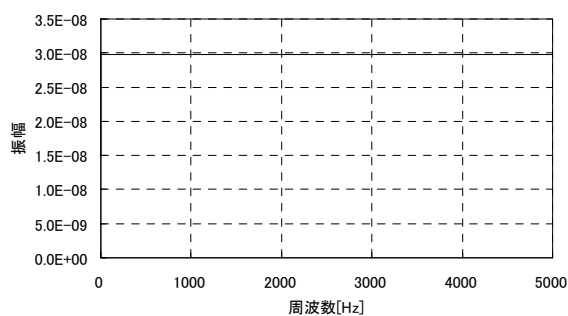


図-4 周波数特性

3. 実験

3.1 検査装置の構成

検査装置の構成を図-5に示し、コンピュータでの処理を図-6に示す。タイムストレッチトパルスを TSP 、対象物のインパルス応答の周波数特性を $Y(f)$ とする。式(2)より生成した TSP は時間領域であるため、IFFT で時間領域へ変換する。逆 TSP は TSP の複素共役で生成し、IFFT で時間領域へと変換する。時間領域の TSP をスピーカを通して対象表面へ放射する。対象表面の振動をレーザー・ドップラー振動計で計測し、時間領域の逆 TSP との畳み込み演算を行い対象のインパルス応答を求める。インパルス応答をFFTし、周波数特性を求め、欠陥の有無を判断する。

対象の内部に欠陥がある場合は、欠陥の固有振動数でたわみ振動が励起され、周波数特性にあらわれることになる。

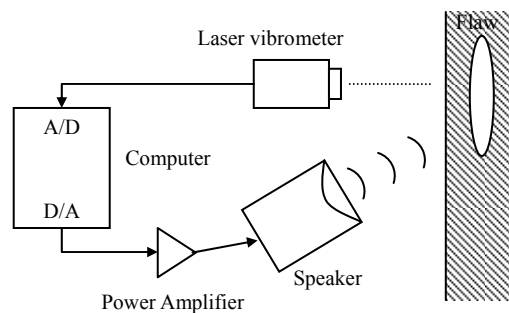


図-5 検査装置の構成

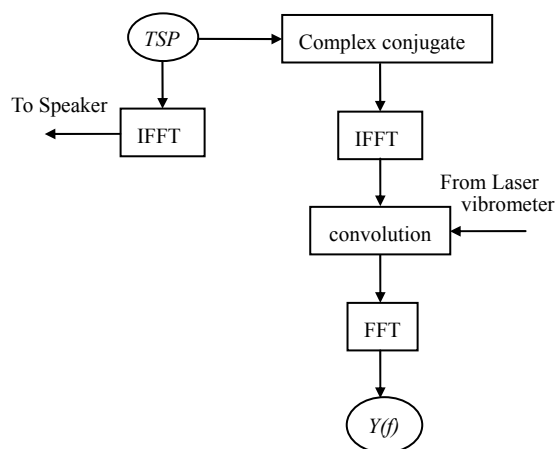


図-6 信号処理の流れ

3.2 原理実証実験

図-7 に示す様な $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 10\text{mm}$ の木板に直径 d の穴を開け、片方の平面上に 0.1mm のステンレス製のシートを接着し人工欠陥を作成した。

比較として、 $d=60\text{mm}$ の円孔を有する木板の振動を衝撃弾性波法で計測した結果を図-8 に示す。この試験体の固有振動数は、約 600Hz であることが分かる。

図-9 は同じ試験体について、タイムストレッチトパルス法でインパルス応答を計測した結果である。図-9 の結果は、図-8 と近い周波数でピークを示しており、タイムストレッチトパルス法を利用して欠陥の固有振動数を検出できることが確認できた。

図-10 は、 $d=50\text{mm}$ の円孔を有する木板をタイムストレッチトパルス法で計測した結果である。約 640Hz でピークを示しており、こちらでも衝撃弾性波法と近い固有振動数を検出することができた。

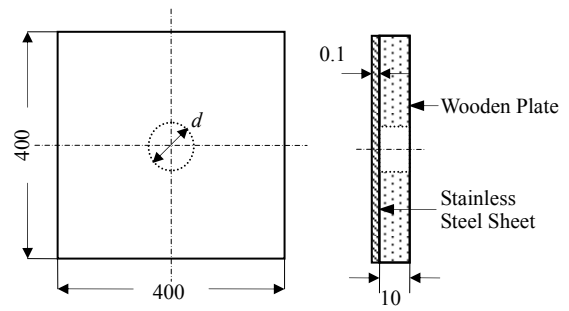


図-7 木板試験体

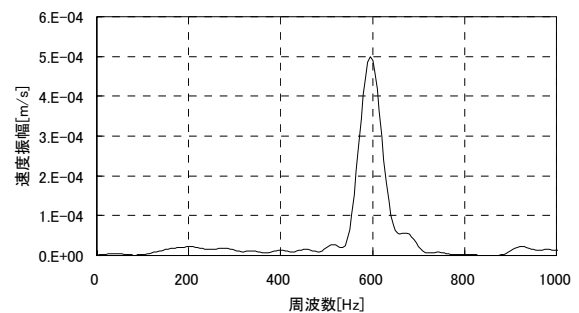


図-8 周波数特性(衝撃弾性波法)

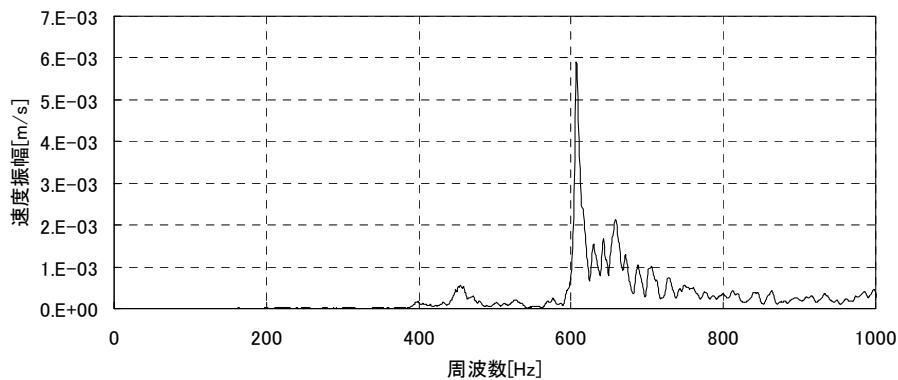


図-9 周波数特性($d=60\text{mm}$)

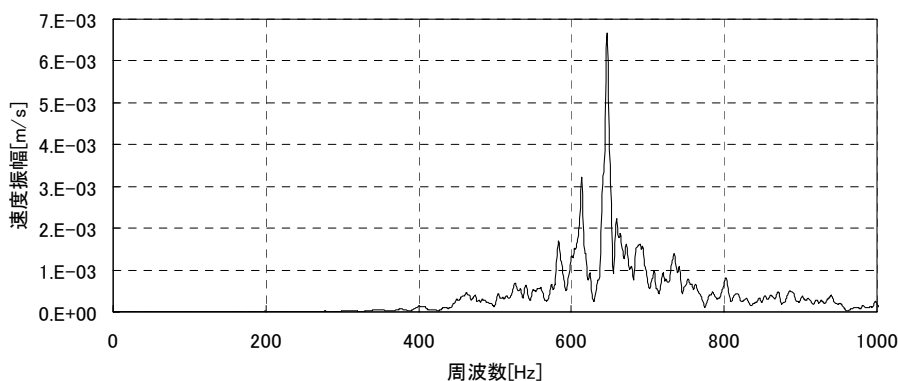


図-10 周波数特性($d=50\text{mm}$)

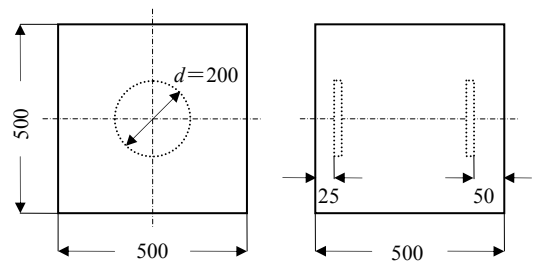
3.3 欠陥検出実験

試験片は、図－11 に示すような、500mm×500mm×500mm のコンクリート片で、表面から25mm、あるいは50mm の位置に、直径200mm、厚さ10mm の円板状の発砲スチロールを埋め込んだ人工欠陥を有するものである。これらの欠陥の固有振動数は、衝撃弾性波法よりそれぞれ、2.65kHz、3.14kHz と求められている。⁷⁾

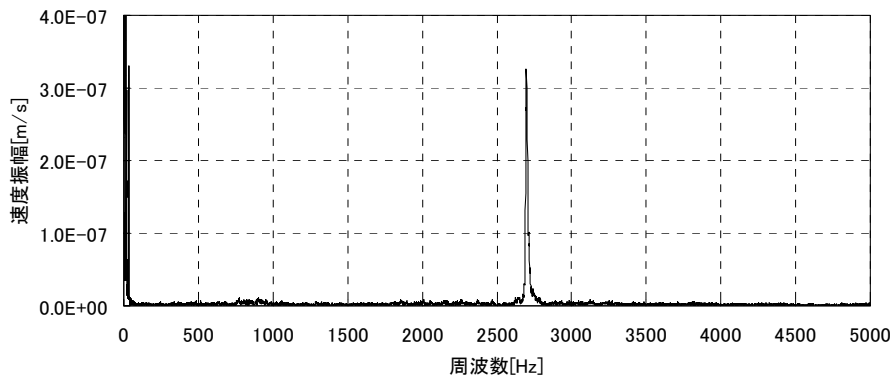
図－12 は、欠陥深さ25mm の試験片の表面にタイムストレッチトパルスを放射し、同じ面の振動速度を計測し、FFT を行った結果である。生成したタイムストレッチトパルスは $N=4096$ 、 $n=1200$ 、サンプリングレートは10kHz であり放射時間は約0.4 秒である。約2.7kHz の振動数でピークがあらわれている。この結果は、衝撃弾性波法の結果とよく一致している。

図－13 は、欠陥深さ50mm の試験片の表面にタイムストレッチトパルスを放射し、反対側の面である欠陥深さ25mm の表面の振動速度を計

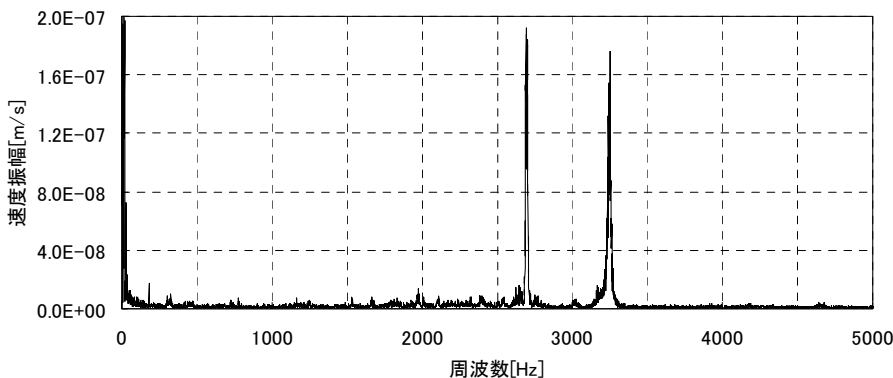
測し、FFT を行った結果である。生成したタイムストレッチトパルスは $N=4096 \times 2^5$ 、 $n=1200 \times 2^5$ 、サンプリングレートは20kHz であり放射時間は約6.5 秒である。前述のパラメータでは音響パワーが少ないため、深さ50mm の欠陥のたわみ振動を励起することができなかったと推測し、 N を増加させ音響パワーを増加させた。約2.7kHz の振動数と約3.25kHz の振動数でピークがあらわれていて、こちらの結果も、衝撃弾性波法の結果とよく一致している。



図－11 コンクリート試験体



図－12 周波数特性(欠陥深さ=25mm)



図－13 周波数特性(欠陥深さ=25mm, 50mm)

4. まとめ

タイムストレッチパルス法を用いて、衝撃弾性波法におけるパルス状の加振を、時間軸上に分散・圧縮処理し、等価的に低い加振力で行う方法を提案した。スピーカーによる音響放射とレーザー・ドップラー振動計による表面振動計測による検査方法を用いて、円孔を有する木板に貼り付けたステンレス板の非接合部分のたわみ振動計測を行い原理を確認し、コンクリート試験片に埋め込んだ人工欠陥の検出を行い本方法の有効性を確認した。

本方法の有効性ならびに、実験の結果から明らかになったことは以下のとおりである。

- (1) タイムストレッチパルス法を用いることで、時間軸上に分散する低い加振力で等価的に強力なパルスを発生させることができる。したがって、安価なシステムで計測が可能である。
- (2) タイムストレッチパルスを音波として放射し表面振動を計測することによって、等価的に非接触で衝撃弾性波計測を行うことができる。
- (3) コンクリート試験片のような音響的に「固い」対象でも、タイムストレッチパルスを用いることによって、S/N 比良く検出することが可能である。

本論文では、タイムストレッチパルス法の周波数情報のみを利用し欠陥の検出を行ったが、タイムストレッチパルス法は時間情報も得ることが可能な方法である。今後は周波数情報と時間軸情報を用いて内部欠陥の大きさおよび表面からの深さを求める方法について検討を重ねたい。また、今回は表面より 25mm および 50mm の深さの欠陥の検出を行ったが、より深い欠陥を求めるための適切なパラメータ値についても検討を重ねたい。

本方法は、衝撃弾性波法のパルス状加振をスピーカーから放射する低い加振力を用いて等価的に行う方法であるため、検査対象に与える影響が最小限である。そのため、衝撃弾性波法の

パルス状加振の代替方法としてだけでなく、多くの検査対象が出現することを期待している。

本研究は平成 17 年度科学研究費補助金(奨励研究)による支援のもとに行った研究である(課題番号：17917011，課題名：非破壊検査における時間伸張パルス法の開発)。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) M. J. Sansalone and W. B. Street : Impact-Echo, Bullbrier Press, pp.1-339, 1997
- 2) 森 和也, A. SPAGNOLI, 村上 敬宣, 鳥越 一平 : コンクリート構造物の圧力波を用いた新しい非接触非破壊検査法, コンクリート年次論文集, Vol 11, No. 1, pp. 1473-1487, 2002
- 3) A. J. Berkhout, D. deVaries, and M. M. Boone : A new method to acquire impulse response in concert halls, J. Acoust. Soc. Am. 68, 179-183, 1980
- 4) N. Aoshima : Computer-generated pulse signal applied for sound measurement, J. Acoust. Soc. Am. 69, pp.1484-1488, 1981
- 5) Y. Suzuki, F. Asano, H. Y. Kim, and T. Sone : An Optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse response, J. Acoust. Soc. Am. 97, pp.1119-1123, 1995
- 6) <http://www.asp.c.dendai.ac.jp>
- 7) K. Mori, I. Torigoe, and N. Momosaki : Nondestructive Inspection of Concrete Structures by Using Sound Wave, Material Science Forum, Vol 465-466, pp.354-360, 2004