

リアルタイムウェーブレットの超音波探傷への応用

中島 富男*

Tomio Nakajima

リアルタイムウェーブレットと呼んでいる高速連続ウェーブレット変換技術を超音波探傷に適用するために構築したシステムとその適用例について紹介する。リアルタイムウェーブレットが超音波探傷における信号処理技術として、非常に有効な手段であることを取得したデータを基に示す。

キーワード：ウェーブレット変換、超音波探傷

1. 概要

現象の特徴を示す信号を抽出するための信号処理技術は、各種方面で注目されてきており、超音波探傷試験への適用も検討され始めている。そのために、アナログフィルタの改良やデジタルフィルタ理論の発展及びフーリエ変換の利用等多くの試みがなされている^{1), 2)}。

近年、ウェーブレット変換が信号処理技術の一つの有力な手法として注目されている。特に、スケールに2のべき乗値を使用することにより高速演算アルゴリズムを適用できる離散ウェーブレット変換技術は、ノイズ除去をはじめとする信号処理や信号圧縮技術等^{3), 4)}に広く応用され、超音波探傷技術においても TOFD 法での S/N 比向上への応用⁵⁾が報告されている。

一方、スケールとシフトを任意に定める連続ウェーブレット変換による時間-周波数解析は、通常、時間軸上のコンボリューション（たたみこ

み積分）で行われるため演算時間負荷が大きいことから、離散ウェーブレット変換ほど適用例は多くない。しかし、井上等は、周波数軸上でのコンボリューションを行うことで演算時間を短縮し、これを超音波探傷試験へ応用できることを報告している⁶⁾。

東京工業大学 水谷等と共同で、周波数軸上でコンボリューションを行う高速連続ウェーブレット変換による時間-周波数解析の TOFD 法への適用を考案した⁷⁾。この高速連続ウェーブレット変換を用いると、超音波探傷波形を取得しながら連続ウェーブレット変換による時間-周波数解析を行い、信号の特徴を示す波形の抽出を、リアルタイムに行うことができる。水谷等は本手法を用いた TOFD 法への適用を報告^{8), 9)}している。

水谷等の開発した技術を基に、高速連続ウェーブレット変換の超音波探傷技術への適用に関する研究を行ったので報告する。本報告では、先ず、連続ウェーブレット変換の定義から高速連続

* 技術研究所

ウェーブレット変換を行う手法の導出を行い、次に、その高速連続ウェーブレット変換を超音波探傷に適用するために構築した計測システムを説明をする。続いて、そのシステムを用いて取得したデータ例について紹介し、高速連続ウェーブレット変換が、超音波探傷の信号処理に有効な手段であることを示す。

なお、この高速連続ウェーブレット変換を用いた信号処理技術をリアルタイムウェーブレットと呼んでいる。

2. リアルタイムウェーブレットの信号処理手法の導出

アナログ信号 $x(t)$ のウェーブレット変換の定義は式1の通りである。ここで、 ψ はマザーウェーブレットであり、 a がスケール、 b がシフトを表す。 $\bar{}$ は複素共役を示す。

$$(W_{\psi}x)(b,a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad \text{式1}$$

ここで、ウェーブレット $\frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ をフーリエ変換し、その結果を $\hat{\psi}_{b,a}$ とすると、

$$\hat{\psi}_{b,a} = \sqrt{a} \hat{\psi}(a\omega) \exp(-j\omega b) \quad \text{式2}$$

を得る¹⁰⁾。 ω, j はそれぞれ角振動数、虚数単位である。

式1にパーセバルの式を適用し、更に式2を使えば、

$$(W_{\psi}x)(b,a) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \overline{\hat{\psi}(a\omega)} \exp(j\omega b) d\omega \quad \text{式3}$$

となる関係を得る¹⁰⁾。

ここまでは信号 $x(t)$ はアナログ信号として扱ってきた。 x を N 個のデジタル信号 $x(n), n=0, 1, 2, \dots, N-1$ として、式3を離散フーリエ変換による書式に改めると、式4を得る。

$$(W_{\psi}x)(n,a) = \sqrt{a} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \overline{\hat{\psi}_{0,a}(k)} \exp(j \cdot 2\pi \frac{kn}{N})$$

式4

ここで、 $X(k)$ は $x(n)$ の離散フーリエ変換結果である。また、シフト b は x の全域 ($n=0, 1, 2, \dots, N-1$) と時間の刻み $\Delta t=1/f_s$ で行うことを考え、 $n=b$ とした。 f_s は $x(n)$ のサンプリング周波数である。また、 $\hat{\psi}_{b,a}$ は $b=0$ 、スケール a でダイレーションしたウェーブレット $\psi_{0,a}(n)$ 基底数列の離散フーリエ変換である。式4は $x(n)$ と $\psi_{0,a}(n)$ のクロススペクトルを逆フーリエ変換したものに \sqrt{a} を掛けたものと同等である。

式4及び $X(k), \hat{\psi}_{0,a}$ を求めるために高速フーリエ変換 (FFT) と高速逆フーリエ変換 (IFFT) を用いることにより、式1の時間軸上のコンボリューションを周波数軸上で高速で行うことが可能となる。この手法がリアルタイムウェーブレットの基礎となる考え方である。

図1にリアルタイムウェーブレットの高速性を、信号のデータ点数による時間軸上でのコンボリューションとリアルタイムウェーブレットによる演算時間の比較により示した。図1の横軸はデータ点数 $2N$ 個のべき数 N である。 2^{15} 個のデータであっても2秒以下の演算時間であり、同時性

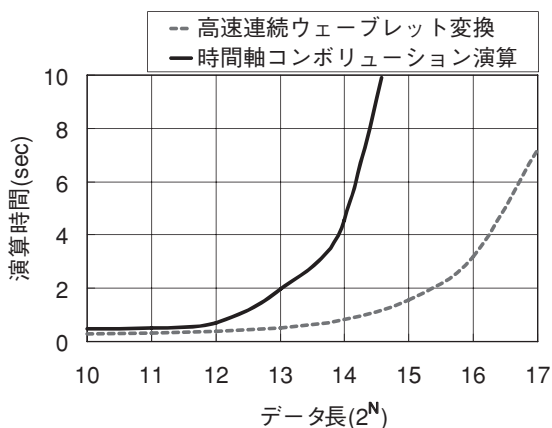


図1 連続ウェーブレット変換演算時間比較

をもった演算時間を維持できる。

3. リアルタイムウェーブレットによる時間一周波数解析結果からの信号抽出方法

連続ウェーブレット変換による時間一周波数解析結果を用いた信号の抽出方法には様々な方法が考えられる。加速度やひずみ計測に適用する場合、原波形の物理量やパワーを維持する必要から複雑な方法が必要となる。しかし、超音波探傷に適用する際には、そのような手順を省くことが可能である。このとき、連続ウェーブレット変換により得られた時間一周波数解析結果から、信号の特徴を最も適切に現す周波数に相当するスケールを見出し、そのスケールの波形を抽出することが重要な手段となる。このことを、簡単な信号例を基に説明する。

信号は周波数 f のサイン波とランダムノイズの和による信号とする。即ち、

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= \sin(2\pi f_1 t) + \text{random}(t) \quad \text{ここで、} 0 \leq t < t_1 \\ x(t) &= \sin(2\pi f_2 t) + \text{random}(t) \quad \text{ここで、} t_1 \leq t \leq t_2 \end{aligned} \right\} \text{式 5}$$

式 5 において、 $f_1=100\text{Hz}$ 、 $f_2=300\text{Hz}$ とした波形を図 2 に示す。random(t) は乱数によるランダムノイズである。

図 2 の波形を連続ウェーブレット変換により時間一周波数解析した結果を図 3 に示す。図 3 において、横軸は時間、縦軸はスケールから換算した周波数であり、色の変化がウェーブレット変換係数を表す。なお、ウェーブレット変換係数は最大値で正規化を行っている。ここで、マザーウェーブレットにはガボールウェーブレットを使用した。

図 3 において、100Hz と 300Hz に縞模様があることが分かる。そこで、周波数 100Hz または 300Hz に相当するスケールの信号を抽出すると図 4 に示す波形を得ることができる。

このように、連続ウェーブレット変換による時間一周波数解析結果から、特徴ある周波数の波形抽出が可能な本手法は、超音波探傷に適した信号処理方法である。

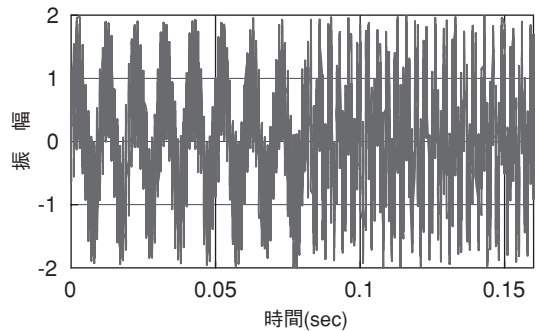


図 2 式 5 の波形

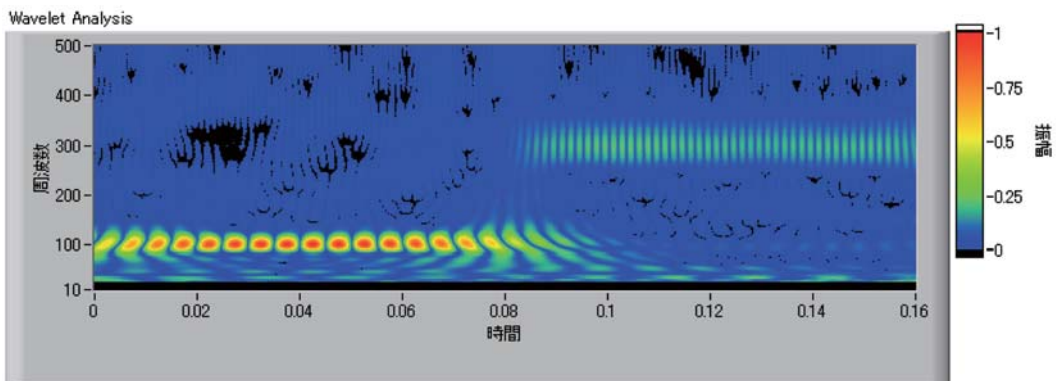


図 3 式 5 の信号の連続ウェーブレット変換による時間一周波数解析結果

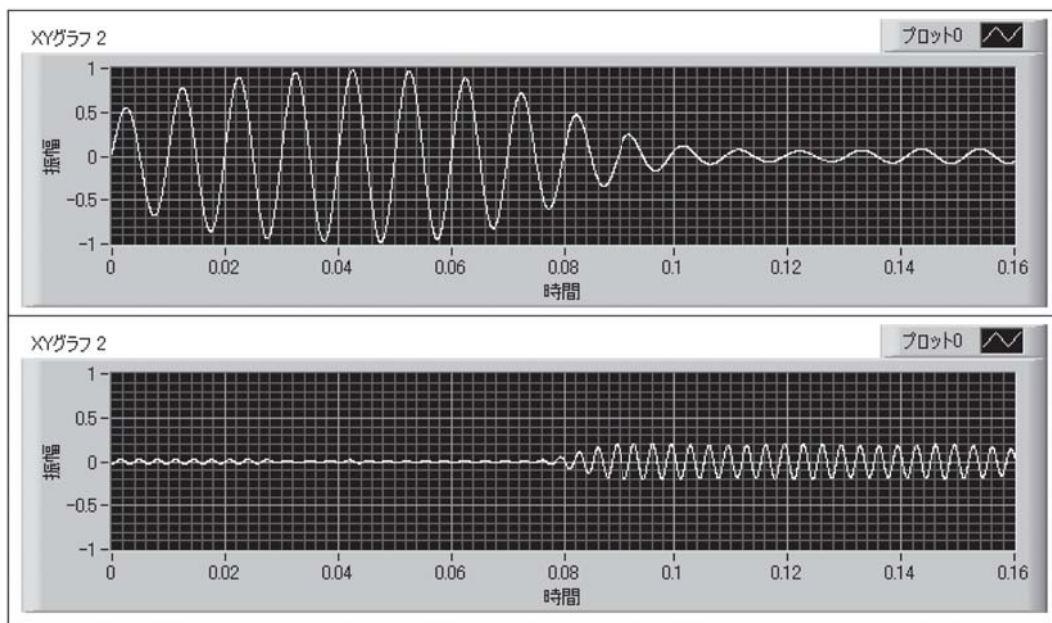


図4 100Hz（上段）300Hz（下段）相当のスケール波形の抽出結果

4. リアルタイムウェーブレットを適用した超音波探傷システムの構築

リアルタイムウェーブレットを適用した超音波探傷システムを、オシロスコープ LeCroy WaveRunner44Xi のカスタム演算機能を用いて構築した。構築したシステムでは、オシロスコープにより取得した波形を、リアルタイムウェーブレットによる時間一周波数解析プログラムに転送及び解析を行う。時間一周波数解析結果から抽出した特定周波数に相当するスケールの波形は、リ

アルタイムにオシロスコープに表示される。オシロスコープに表示される原波形は解析結果が表示されるまで更新されないようになっている。

システムのハードウェア構成概要を図5に示す。また、システムのソフトウェアの基本構成を図6に示す。

構築したシステムにより、標準試験片 STB-A2 の底面エコーを探触子 5Z10N で観察した結果を図7に示す。図7はオシロスコープ表示画面のハードコピーである。図7には3段のグラフがあるが、上段がオシロスコープにより取得した原

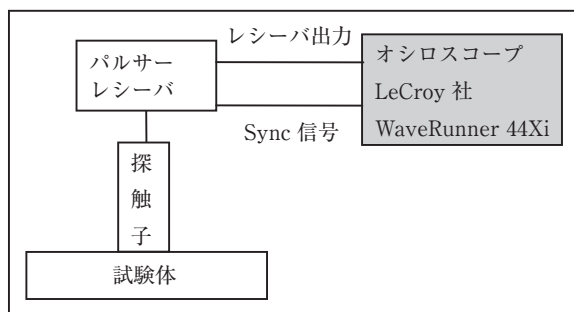


図5 構築した超音波探傷システムハードウェア構成の概要

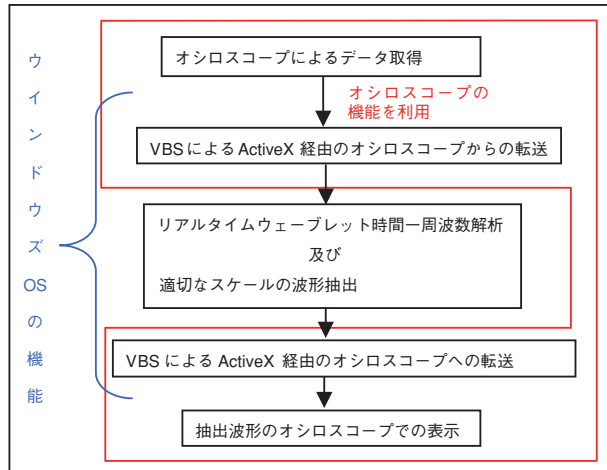


図6 構築したシステムのソフトウェア構成概要

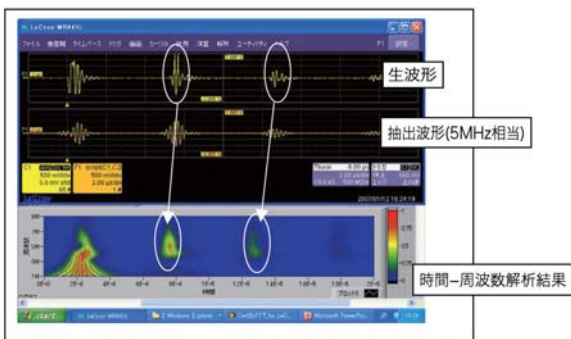


図7 標準試験片 (STB-A2) 底面エコー観察結果
超音波探傷子：5 Z10N(ジャパンプローブ社製)
マザーウェーブレット：ガボールウェーブレット

波形、下段がリアルタイムウェーブレットによる時間一周波数解析結果、中段が時間一周波数解析結果から抽出した、特徴ある周波数に相当するスケールの波形である。図7では5MHz相当の波形を抽出している。

マザーウェーブレットにメキシカンハットを用いた場合の同様の結果を図8に示す。メキシカンハットはガボールウェーブレットよりも周波数分解能は低いが時間局在性が高い性質がある。抽出周波数は5MHzと同じであるが、抽出波形において、底面エコーの時間軸的広がりが抑制されている。

ここで示したように、マザーウェーブレットを



図8 標準試験片 (STB-A 2) 底面エコー観察結果
超音波探傷子：5 Z10N(ジャパンプローブ社製)
マザーウェーブレット：メキシカンハット

その特徴により使い分けられることも、本システムの特徴の一つである。

図9にリアルタイムウェーブレット解析画面の例を示す。図9に例示した解析プログラムは前述の通り、カスタマイズした演算機能として、オシロスコープのバックグラウンドで動作する。

5. 構築したシステムの超音波探傷への適用例

構築したシステムを超音波探傷へ適用した3例を示す。

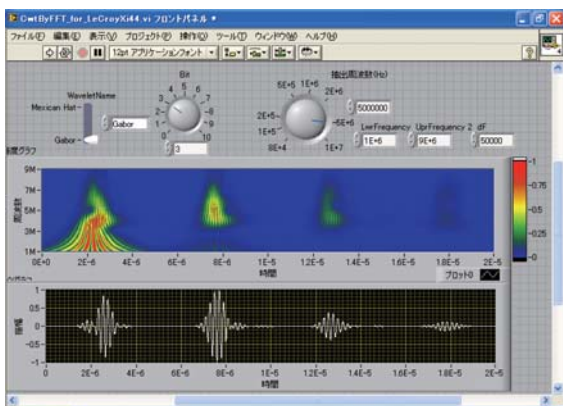


図9 リアルタイムウェーブレット解析画面の例

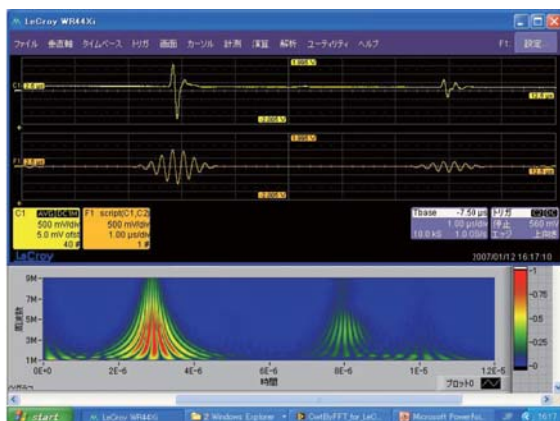


図11 B5C10NによるSTB-A2底面エコー周波数分布

(1) 探触子の周波数特性

探触子に狭帯域の5Z10Nと広帯域のB5C10Nを使い、標準試験片STB-A2の底面エコーの周波数特性の差異を図10と図11に示す。これらの図中のグラフの配置は図7と同じであり、使用したマザーウェーブレットはガボールウェーブレットである。図10と図11の時間一周波数解析結果より、5Z10Nで観察した底面エコーは探触子の中心周波数である5MHz近傍に偏在しているが、広帯域であるB5C10Nで観察した底面エコーは周波数軸（縦軸）に広く分布していることが分かる。このように、本システムを使用することにより、探触子の違いによ

るエコーの周波数分布が信号取得と同時に得ることができる。

(2) オーステナイト系ステンレス鋼肉盛溶接金属試験片の底面エコー計測

オーステナイト系ステンレス鋼肉盛溶接金属試験片（以下、試験片1）の厚さ計測を試みた。肉盛溶接金属試験片の厚みは80mmで、全てが溶接金属である。試験片の写真を図12に示す。なお、比較のために同形状のSUS304試験片（以下、試験片2）も作製した。各試験片の底面エコーを計測した結果を図13と図14及び図15



図10 5Z10NによるSTB-A2底面エコー周波数分布

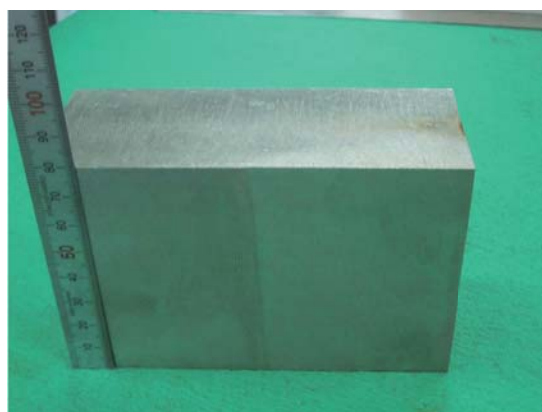


図12 オーステナイト系ステンレス鋼肉盛溶接金属試験片



図 13 試験片 2 厚さ計測結果
(マザーウェーブレット：ガボールウェーブレット)

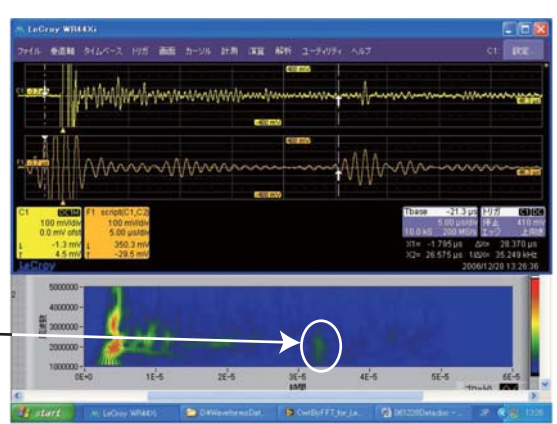


図 14 試験片 1 厚さ計測結果
(マザーウェーブレット：ガボールウェーブレット)

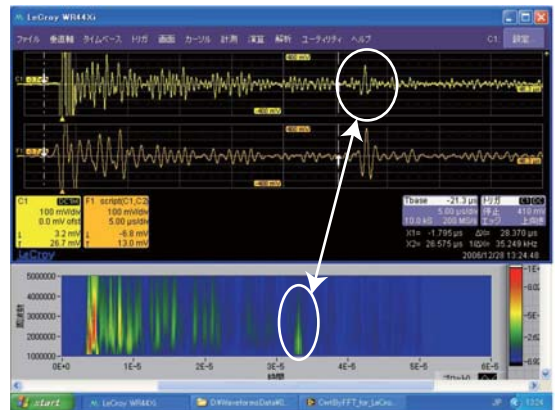


図 15 試験片 1 厚さ計測結果
(マザーウェーブレット：メキシカンハット)

に示す。

マザーウェーブレットにガボールウェーブレットを用いた図 14 と図 13 の比較より、底面エコーの周波数帯域が、試験片 1 では試験片 2 に対して低周波側に遷移していることが分かる。また、特に原波形において、溶接金属の試験片 1 のノイズの方が増加している。図 14 より、試験片 1 の底面エコーが 2MHz 以下と分かったため、マザーウェーブレットをメキシカンハットに変更し、時間一周波数解析を行い、1.2MHz 相当のスケールでの波形を抽出した結果を図 15 に示している。原波形に対して、抽出波形ではノイズが大きく低減できているのが分る。

(3) 異材溶接継手の人工スリットエコー計測

炭素鋼とオーステナイト系ステンレス鋼をインコネル溶接金属により溶接した異材溶接継手試験片の断面形状を図 16 に示す。この試験片では、溶接継手部ステンレス鋼母材内面側に応

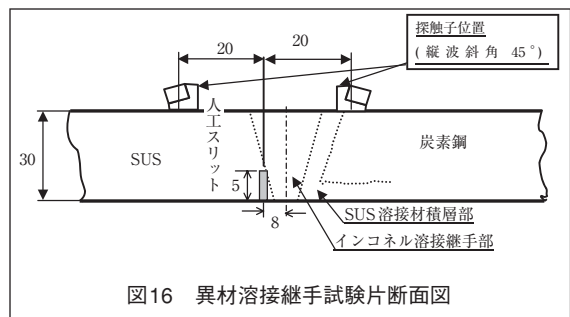


図 16 異材溶接継手試験片断面図

力腐食割れを模擬した高さ 5mm の開口人工スリットを付与してある。この試験片に対し、人工スリットに対してステンレス鋼側から炭素鋼側から縦波による斜角探傷（屈折角 45 度）を行った。

ステンレス鋼側から探傷結果を図 17 に示す。この時、信号処理を行うことなく人工スリット端部と開口部エコーが原波形で明瞭に検知できた。一方、炭素鋼側の探傷結果を図 18 に示すが溶接金属部内での超音波の散乱により、原波形のままでは人工スリット端部エコーの検知が困難であった。

図 19 ~ 図 22 に図 18 の波形をリアルタイムウェーブレットにより時間一周波数解析した結果を示す。

図 19 及び図 20 はマザーウェーブレットにガボールウェーブレットを使用したときの結果で

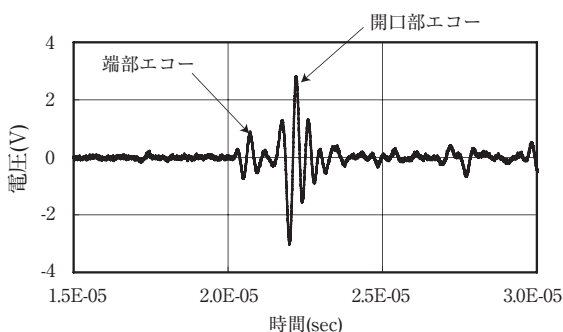


図17 ステンレス鋼側からの探傷波形

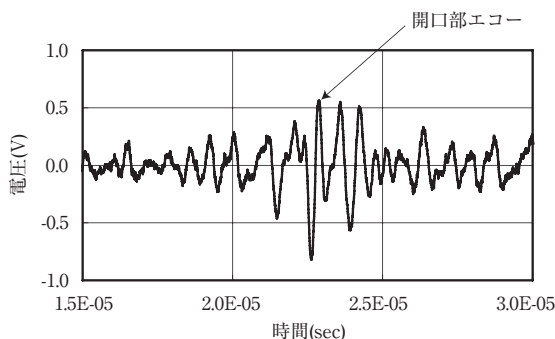


図18 炭素鋼側からの探傷波形

ある。時間一周波数解析結果から 1MHz 付近と 2MHz 付近の強度が強いことが分かったため、図 19 では 1MHz 相当のスケールでの波形を、図 20 では同様に 2MHz 相当のスケールの波形を抽出している。抽出波形が開口部エコー付近の時間帯に広く分布してしまい、端部エコーと開口部エコーの識別が困難になっている。

図 21 と図 22 は図 18 の波形に対して、マザーウェーブレットにメキシカンハットを適用した結果である。時間一周波数解析の結果から、1MHz 以下に開口部エコーと思われる強い信号があることが分かる。図 21 は 0.8MHz 相当のスケールの波形を抽出したものであるが、開口部及び端部エコー以外のエコー信号も抽出しており、信号の特徴抽出が十分ではない。図 22 は時間一周波数解析結果で、開口部エコーの直前の 2MHz 以下の帯域にある強い信号を排除するため、2.5MHz 相当のスケールの波形を抽出した結果である。この抽出波形の拡大したものを図 23 に示す。人工スリット端部エコーと考えられる信号が原波形よりも強調させて示すことができた。また、この波形はステンレス鋼側から得られた波形に類似しているのが分る。

リアルタイムウェーブレットの応用方法は、信号の強度が強い帯域に着目するだけでなく、信号強度が弱い帯域であっても、必要とする情報を含んだ波形の抽出が可能であることを異材溶接継手において例示したものである。

6. まとめと今後について

リアルタイムウェーブレットによる信号処理方法を超音波探傷に適用するためのシステムを構築した。構築したシステムによれば、従来の時間軸上でコンボリューション演算を行う場合に対して、演算処理の高速化が可能であった。構築したシステムを実際に超音波探傷に適用し、

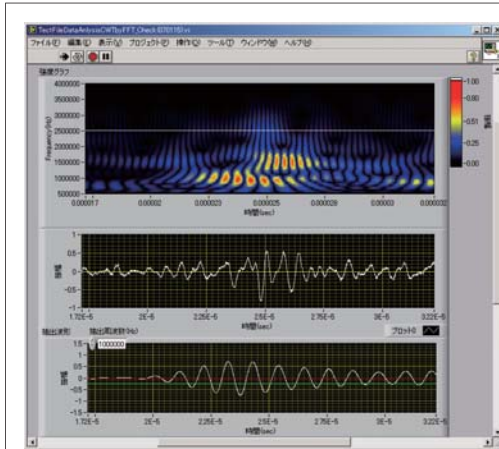


図19 図18波形の連続ウェーブレット解析結果①
マザーウェーブレット:ガボールウェーブレット
抽出周波数:1MHz

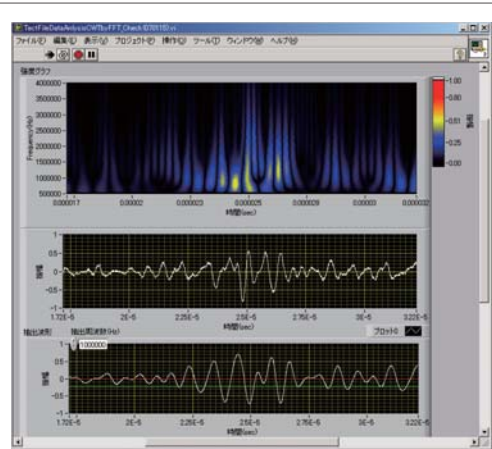


図21 図18波形の連続ウェーブレット解析結果③
マザーウェーブレット:メキシカンハット
抽出周波数:0.8MHz

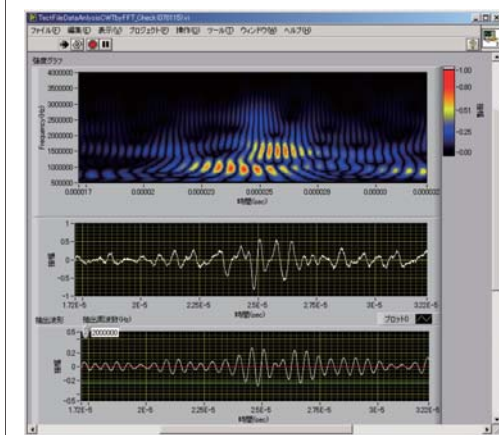


図20 図18波形の連続ウェーブレット解析結果②
マザーウェーブレット:ガボールウェーブレット
抽出周波数:2MHz

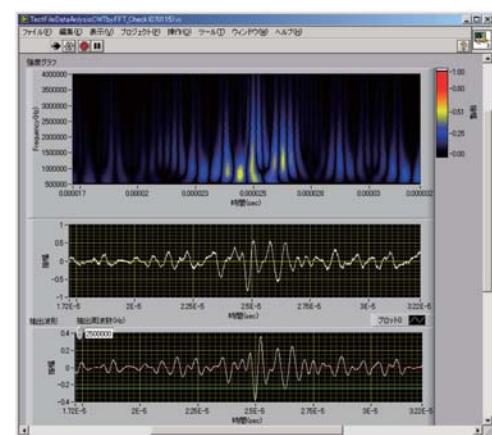


図22 図18波形の連続ウェーブレット解析結果④
マザーウェーブレット:メキシカンハット
抽出周波数:2.5MHz

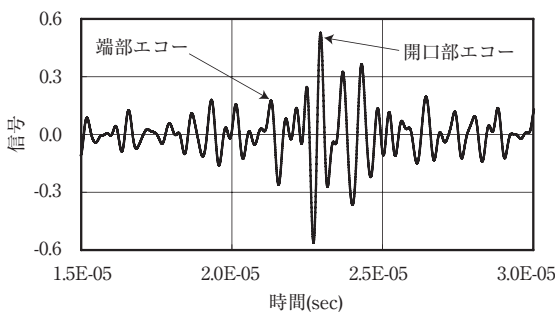


図23 リアルタイムウェーブレットによる抽出波形

- 超音波探触子の周波数特性評価
- 散乱の大きな試験片の厚さ計測
- 散乱の大きな試験片の人工スリットの探傷

に应用できることを示した。これらの例はリアルタイムウェーブレットによる時間一周波数解析結果を、それぞれ異なる手法を使って信号の特徴抽出を行ったものである。これらの例より、リアルタイムウェーブレットは超音波探傷技術において有効な信号処理手段であると言える。

今後更にシステムの高速度などの改善に努めて

いくと共に、現在超音波探傷試験が困難とされる種々の適用事例に応用して検査精度の向上に努めていく所存である。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、多大なご指導とご協力を賜った東京工業大学 水谷助教授と大学院博士課程 黒川さんに深く感謝します。

参考文献

- 1) 樋口・川又、「デジタル信号処理」、昭晃堂、2000年3月
- 2) 日野、「スペクトル解析」、朝倉書店、1977年10月
- 3) チュウイ、「ウェーブレット応用」、東京電気大学出版局、1997年12月
- 4) 中野・山本、吉田、「ウェーブレットによる信号処理と画像処理」、1999年8月
- 5) 畠中・井戸・降駒・荒川、「9%Ni銅溶接部の超音波 TOFD 法による探傷へのウェーブレット信号処理手法の検討」、非破壊検査第 53 巻 2 号、2004 年
- 6) 井上・岸本・中西・堀・荒井・渋谷、「エコー波形のウェーブレット解析による超音波の速度と減衰の算定」、非破壊検査第 46 号 3 巻 3 号、1997 年
- 7) 荒川・水谷・井上・黒川、「超音波検査方法と装置」、特開 2006-200901
- 8) 黒川、「超音波探傷試験における妨害波の信号処理による低減」、東京工業大学 卒業論文、2005 年 2 月
- 9) 黒川・水谷・井上、「時間一周波数解析を用いた TOFD 法による欠陥高さ測定の高度化」、非破壊検査第 55 巻 12 号、2006 年
- 10) チュウイ、「ウェーブレット入門」、東京電気大学出版局、1993 年 5 月



技術研究所

中島 富男

TEL. 045-759-2927

FAX. 045-759-2155