

FBR 蒸気発生器伝熱管検査における
渦電流探傷へのウェーブレット解析技術の適用
(研究報告)

2001年3月

核燃料サイクル開発機構
敦賀本部
国際技術センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2001

2001年3月

FBR 蒸気発生器伝熱管検査における渦電流探傷へのウェーブレット解析技術の適用
(研究報告)

宇田川一幸^{*1}, 光元里香^{*2}
横山邦彦^{*3}, 辻啓一^{*3}, 遠藤昭^{*4}

要　旨

高速炉プラントにおいては、蒸気発生器伝熱管のきずを検出するため、渦電流探傷試験による検査を実施することとしており、現在、その検査技術高度化のための検討を行なっている。これまでの検討結果によれば、伝熱管形状の相違などから軽水炉プラントとは異なった雑音が見られるケースがあり、SN比の改善について一層の工夫が望まれている。

本研究では、雑音下での特異信号の検知を容易にする信号処理手法として近年注目されているウェーブレット解析を用い、高速炉プラントにおける雑音下で SN 比が向上できるかどうかを評価した。伝熱管の試験片に人工きずを施し、この試験片から得られる渦電流探傷データを前記した振動雑音に重畠させて解析した。

その結果、ウェーブレット解析により SN 比が数倍程度改善できることがわかった。また、この改善効果を従来の線形フィルタと比較しても、高い効果が得られることがわかった。例えば、離散ウェーブレット解析では、その効果は、ローパスフィルタを用いた結果の約 1.4 倍であった。

ウェーブレット解析は、従来のフーリエ解析と比較して、突変的な信号応答の検出能力が優れている。本研究により、高速炉プラントの蒸気発生器伝熱管探傷時に生ずるノイズ環境下のきず部波形検知に関しても、このようなウェーブレット解析の有効性が定量的に示せた。

^{*1}敦賀本部 国際技術センター プラント制御工学グループ

^{*2}原子力システム株式会社

^{*3}敦賀本部 国際技術センター プラント機器技術開発グループ

^{*4}敦賀本部 国際技術センター

March,2001

Application of Wavelet Analysis to Signal Processing for Eddy-Current Testing
of FBR Steam Generator Tubes

Kazuyuki Udagawa^{*1}, Rika Mitsumoto^{*2}
Kunihiro Yokoyama^{*3}, Keiichi Tsuji^{*3}, Akira Endo^{*4}

Abstract

We have been studying an advanced signal processing method for ECT (Eddy-Current Testing) to detect flaws in heat exchanger tubes of steam generators in a FBR (Fast Breeder Reactor) plant. The data obtained from the testing of these steam generator tubes showed some noise characteristics different from ones in light water reactor plants. Thus, an improvement of the signal-to-noise ratio of the processed ECT data is desired in order to increase reliability of the inspection.

We have evaluated the signal-to-noise ratio as a performance measure using the actual plant data by means of wavelet analysis technique, which has been applied successfully in many fields to detect anomalous signals.

First, we synthesized an ECT data containing flaws by combining the noisy signals from an in-field inspection of one heat exchanger tube with separately measured flaw signals from a calibration piece that had various machined flaws. Next, we evaluated the performance of the wavelet analysis technique by comparing it with a reference Fourier method.

The performance of this technique is much better than by conventional analysis. For example, the signal-to-noise ratio of the discrete wavelet analysis method is 1.4 times greater than that by a conventional, low-pass filter method.

Thus, we have shown that wavelet analysis has advantages over conventional method of detecting flaws in FBR steam generator tubes because of its sensitivity to localized events, such as sudden signal changes.

*1 Control Engineering Group, International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga Head Office

*2 Nuclear Engineering System Inc.

*3 Plant Technology Development Group, International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga Head Office

*4 International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga Head Office

目 次

	頁
1. はじめに	1
2. 対象信号	2
2. 1 試験手法の概要	2
2. 2 信号の概要	2
2. 3 従来の解析手法による結果	3
3. ウエーブレット解析	3
3. 1 解析手法の概要	3
3. 2 連続ウェーブレット解析	4
3. 3 離散ウェーブレット解析	4
3. 4 評価の指標	5
4. 結果	6
4. 1 連続ウェーブレット解析	6
4. 2 離散ウェーブレット解析	6
4. 3 SN 比改善割合	7
5. 考察	7
5. 1 ウエーブレット解析の効果	7
5. 2 外面 2%きず波形の検出感度	8
5. 3 連続解析と離散解析の相違	9
6. おわりに	9
参考文献	10

表目次

	頁
表1 試験片の人工きず形状	12
表2 SN比の改善割合	12

図目次

	頁
図 1 漩電流探傷装置の概要	13
図 2 漩電流探傷回路の基本構造	13
図 3 同期検波	13
図 4 伝熱管試験片の漩電流探傷信号	14
図 5 漩電流探傷信号におけるバックグラウンドノイズ	14
図 6 評価に用いる漩電流探傷データの抽出	15
図 7 評価用に人工合成した漩電流探傷データ	15
図 8 ローパスフィルタの効果	16
図 9 ウエーブレット	17
図 10 マザーウエーブレットのトランスレート及びスケーリング	17
図 11 信号平面概念図	17
図 12 本報告書で用いたマザーウエーブレット波形	18
図 13 連続ウェーブレット変換の結果	19
図 14 連続ウェーブレット変換・再構成による結果	20
図 15 離散ウェーブレット変換の結果	21
図 16 離散ウェーブレット変換・再構成による結果	21
図 17 きず波形強度の影響を評価	22
図 18 連続ウェーブレット変換・再構成による結果	23

1. はじめに

原子力プラントの定期検査では蒸気発生器(SG)の伝熱管のきずを検出するため、渦電流探傷試験(ECT: Eddy Current Testing)が行われている^{[1] ~ [10]}。高速炉プラントにおいても、ECTによる検査を実施することとしており、現在、その検査技術高度化のための検討を行っている。これまでの検討結果によれば、伝熱管形状の相違などから軽水炉プラントとは異なった雑音が見られるケースがあり、SN比の改善について一層の工夫が望まれている。

従来の信号処理手法であるフーリエ解析では、周波数解析の際に時間に関する情報が失われてしまうが、ウェーブレット解析^{[11] ~ [18]}によれば、その情報が維持できる利点がある。このことから、同解析手法を用いて、雑音下での特異信号の検知が容易になることが期待され、原子力プラントへの応用も積極的に研究されている^{[14] ~ [29]}。特に文献[25], [26]では、軽水炉プラントにおけるSG伝熱管ECTへの適用が検討され、その有効性が確認されている。

前記の軽水炉とは異なった雑音は、ECTセンサが伝熱管内を移動中に振動したために発生しているものと考えられている。以下、この振動ノイズをウォーブリングノイズと呼ぶ。*wobbling noise*

このウォーブリングノイズを低減させるために、従来の手法である線形なフィルタを用いると、検知したいと考えているきず部の波形までもその大きさが低減してしまい、SN比の向上が期待できない。

一方、ウェーブレット解析では、マザーウェーブレットと呼ぶ局在波を基準にして、対象となる波形との相関の強度を解析するので、波形の時間変化に敏感な解析結果が得られる。そこで、前記のようなウォーブリングノイズ環境下でも、適切なマザーウェーブレットの選択により、きず部波形の大きさを減ずることなく、結果としてSN比の向上が期待できる。

本報告では、このようなウェーブレット解析の利点により、ウォーブリングノイズ下でのきずの検知可能性、具体的にはSN比の向上としてどれだけ向上できるかを評価する。

次章では、本報告で評価用に用いるECTデータ及びその試験の概要について述べ、このデータを用いてフーリエ解析による信号処理の例を示し、そのSN比の改善限界を示す。次に、3章ではウェーブレット解析について、本報告で用いる連続変換、離散変換の各手法を説明する。そして、ウェーブレット解析による結果を4章に、その考察を5章に述べる。

2. 対象信号

2.1 試験手法の概要

本研究では、図 1 に示す ECT 装置から得られた信号データを評価に用いる。交流電流の流れている電導体コイルを金属に近づけると、電磁誘導により金属に渦電流が生ずる。図 1 の ECT 装置では、このようなコイルを内蔵したプローブを伝熱管内に走行させ、きずに生ずるインピーダンス変化を測定している。

センサから得られた信号は、図 2 に示す ECT 回路により探傷信号として取り出され、CRT 上に表示され、データとして記録される。探傷信号としての取り出しは、同期検波と呼ばれる方法が用いられる。すなわち、発振器の基準信号に基づいて試験コイルに交流電流が流れ、図 3 に示す様に、この基準信号と試験コイルから得られた信号との同期信号を取り出すことにより、バックグラウンドの雑音成分から探傷信号を分離して取り出す。

ECT の原理及び、基本的な回路構成^[30]については、軽水炉プラントのものと同一であるが、現在、高速炉プラント向けの高度化が進められている。

高速炉プラント用蒸気発生器は、伝熱管の形状がヘリカルコイル型であることなどの軽水炉プラントとは異なっている点を持っており、これらの相違により、雑音の混入状況等に相違が現れる可能性が考えられる。

2.2 信号の概要

伝熱管試験体から得られた ECT 信号の波形を図 4 に示す縦軸は電圧、横軸は時間を示す。この試験体には、表 1 に示す形状のきずを施している。このきずに対応した信号波形が図 4 に示されている。同図上では、表 1 のきず形状との対応を、きずの施された面とその深さとを用いて、内面 5% もしくは外面 2% のきずなどと呼んでいる。なお、これらのきず波形の前後では、配管フランジ部での応答波形も示されている。以下、本報告では、同試験片のきず波形に言及する際にこれらの呼称を用いる。

さらに、健全な伝熱管を用いたバックグラウンド測定において、図 5 に示すようなウォーブリングノイズと呼ばれる雑音が測定されている。軽水炉プラントと異なるヘリカルコイル型の伝熱管形状などに起因して、伝熱管移動中にプローブが振動し、このような雑音が生じていると考えられる。なお、同図上では、伝熱管外側に密着する伝熱管支持部からの影響が、約 3 秒間隔の信号変化となって現れている。

本報告では、図 5 に示されたような雑音発生状況の下でも、図 4 に示されたきず

波形が識別できるよう、その SN 比向上が可能かどうかを検討することが目的である。そこで、図 5 の雑音波形に図 4 のきず波形を重畠させたデータを作成し、これを伝熱管試験体から得られた渦電流探傷試験データと見なし、以下の解析のテストデータとする。

ただし、図 5 のきず波形すべてを用いるのではなく、信号振幅の小さい外面 5%及び外面 2%と呼ぶきず波形のみを対象とし（図 6），上記の方法で雑音データと重畠させた（図 7）。

2.3 従来の解析手法による結果

従来の信号解析において一般的な手法である線形フィルタ処理により、きずの信号の検出を試みた。

カットオフ周波数 5Hz 及び、0.1Hz のローパスフィルタを用いて、図 7 のデータを処理した結果をそれぞれ図 8(a), (b)に示す。

カットオフ周波数 5Hz のフィルタ処理では、バックグラウンドノイズの除去が不十分であり、外面 2%きず波形が雑音に埋もれたままとなっている。一方、カットオフ周波数 0.1Hz とした場合では、きず信号の強度も減衰し、やはり、外面 2%きずの波形の識別が困難である。

以上のように、線形フィルタでは、外面 5%きず波形の識別は容易になるものの、外面 2%きずの波形については、雑音からの分離が困難である。

3. ウエーブレット解析

3.1 解析手法の概要

フーリエ解析では、解析対象の信号を異なる周波数成分からなる正弦波に分解する。それに対して、ウェーブレット解析では、解析対象の信号をウェーブレットと呼ばれる局在波（図 9）からなる成分に分解する。

すなわち、このウェーブレットを平行移動（トランスレート）及び、伸縮（スケーリング）^[12]させ（図 10），対象信号がどのような成分から構成されているかを解析する。このようにして基準波として用いるウェーブレットを、マザーウェーブレットと呼んでいる。

フーリエ解析及び、ウェーブレット解析の解析結果のひとつである信号平面を図 11 に示す。フーリエ解析では、変換によって時間軸の情報が失われるのに対して、ウェーブレット解析では、時間情報を残したままで周波数領域表現が可能となる。

これにより、ウェーブレット解析では、従来困難であった局所的変化の検出などが容易になる。

また、フーリエ解析におけるフィルタのように、解析対象信号を再構成と呼ばれる逆変換により復元することで雑音等を低減することが可能である。

マザーウェーブレット $\psi(x)$ に対して、 b だけの移動(トランスレート)、 a 倍の拡大(スケーリング)の変換をした関数 $\psi((x-b)/a)$ と、解析対象の信号との相関強度を計算することが、ウェーブレット解析の基本となる。解析する対象の全領域で連続してトランスレート及びスケーリングする解析を、連続ウェーブレット解析という。一方、上記の関数を用いて 2 のべき乗ごとに、トランスレート及びスケーリングする解析を、離散ウェーブレット解析という。各々の手法の詳細については、次節以下で述べる。

3.2 連続ウェーブレット解析

上記の関数 $\psi((x-b)/a)$ 及び、解析対象となる信号 $f(x)$ を用いてウェーブレット変換 $(W_\psi f)(b, a)$ は (3.1) 式により定義される。

$$(W_\psi f)(b, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int \overline{\psi(\frac{x-b}{a})} f(x) dx \quad (3.1)$$

所定の強度より大きい値に対応するウェーブレット係数 $(W_\psi f)'(b, a)$ を選択し、この係数を用いて (3.2) 式の変換による再構成を行い、ノイズを除去する。

$$f'(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|} C_\psi} \int \{(W_\psi f)'(b, a)\} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \frac{dad}{a^2} \quad (3.2)$$

マザーウェーブレット $\psi(x)$ としては、図 4 で示した外面 5% のきず波形を切り出して使用する(図 12(a))。また、汎用的な関数として、最も単純な Haar(図 12(b)) 及び Mexican Hat^[12](図 12(c)) を採用し、各々の解析結果を比較する。

3.3 離散ウェーブレット解析

離散ウェーブレット変換式は、上式 (3.1) を離散化することによって得られる。ここで、 (b, a) は 2 つの整数 j, k を用いて $(b, a) = (2^{-j}k, 2^{-j})$ と置くことで離散化する。すなわち、離散ウェーブレット変換式は (3.3) で表わすことができる。

まず、解析対象となる信号 $f(x)$ を (3.3) 式により離散ウェーブレット変換し、(3.4) 式で示すように低周波数成分 $A_j(x)$ と高周波数成分 $D_j(x)$ に分解する。

$$(W_\psi f)(2^{-j}k, 2^{-j}) = 2^j \int \psi(2^jx - k) f(x) dx \quad (3.3)$$

$$f(x) = A_j(x) + \sum_{j \leq J} D_j(x) \quad (3.4)$$

上記の (3.4) 式の右辺は、ウェーブレット係数 $(W_\psi f)(2^{-j}k, 2^{-j})$ を用いて (3.5) 式のように表せる。

$$f(x) = A_j(x) + \sum_{j \leq J} \sum_k (W_\psi f)(2^{-j}k, 2^{-j}) \psi_{j,k}(x) \quad (3.5)$$

ここで、しきい値 S を設け、 $D_j(x)$ がしきい値以上の強度を示すように、次式のウェーブレット係数 $(W_\psi f)(2^{-j}k, 2^{-j})$ を選択する^[11]。

$$(W_\psi f)'(2^{-j}k, 2^{-j}) = \begin{cases} (W_\psi f)(2^{-j}k, 2^{-j}) & |(W_\psi f)(2^{-j}k, 2^{-j})| \geq S \\ 0 & |(W_\psi f)(2^{-j}k, 2^{-j})| < S \end{cases} \quad (3.6)$$

選択したウェーブレット係数 $(W_\psi f)'(2^{-j}k, 2^{-j})$ を用いて、再構成と呼ばれている (3.7) 式の変換をすることにより、ノイズ成分を除去する。

$$f'(x) = \sum_{j=1} \sum_k \{(W_\psi f)'(2^{-j}k, 2^{-j})\} \psi_{j,k}(x) \quad (3.7)$$

マザーウェーブレットとしては、局所性が良好な 5 次の Daubechies 関数^[13] (図 12(d)) を用いる。

3.4 評価の指標

本報告では、信号処理手法の有効性を評価するが、この評価の指標としてまず波形と雑音の SN 比を用いる。すなわち、信号処理する前の SN 比と処理後の SN 比の割合である次式の $R(S/N)$ を改善割合として評価する。

$$R(S/N) = \frac{S}{N} / \frac{S_o}{N_o} \quad (3.8)$$

ここで、

S_o : 欠損部 x からの信号波形の振幅

N_o : バックグラウンドノイズ波形の標準偏差

S : 解析処理後の欠損部 x からの信号再現波形の振幅

N : 解析処理後のバックグラウンドノイズ波形の標準偏差

4. 結果

4.1 連続ウェーブレット解析

マザーウェーブレットとして外面 5%のきず波形を用い、連続ウェーブレット変換を実施した結果を図 13 に示す。同図(a)では信号平面図上で強度を示し、(b)では 3 次元で表示した。配管支持部及び外面 5%きずを通過する時間において、強度が大きくなっているのがわかる。一方、外面 2%きずを通過する時間においては、その強度が雑音と同レベルの大きさとなっており、きずの検出が困難となっていることが示されている。

この変換後の強度に対してしきい値を設け、しきい値よりも大きな値を示す係数のみを取り出し、ECT 信号波形を再構成した。同様にして、マザーウェーブレットとして Haar 関数、Mexican Hat 関数を用いた連続ウェーブレット変換を実施し、ECT 信号波形を再構成した。

これらの再構成波形について、マザーウェーブレットとして外面 5%きず波形、Haar 関数、Mexican Hat 関数を用いた結果を、それぞれ図 14 の(a)～(c)に示した。どのマザーウェーブレットを用いた結果も同様であり、図 7 の原波形と比べて 1Hz 以上の雑音信号が除去され、外面 5%きず波形の検出が容易となっているのがわかる。また、カットオフ周波数 5Hz のローパスフィルタ処理を施した図 8(a)の波形と比べるとバックグラウンド雑音が除去されており、カットオフ周波数 0.1Hz のローパスフィルタ処理を施した図 8(b)の波形と比べるときずの波形が保たれている。すなわち、外面 5%きず波形については、従来のフィルタ処理と比較して、きず波形の検出が容易となっているといえる。しかしながら、外面 2%きず波形については、どのマザーウェーブレットを用いた結果もきず波形を検出できなかった。

4.2 離散ウェーブレット解析

3.3 で示した手順で離散ウェーブレット変換した結果を図 15 に示す。同図には、解析対象の信号 f 、解析結果となる低周波数成分 A_4 、高周波数成分 $D_1 \sim D_4$ が示されている。高周波数成分 $D_1 \sim D_4$ については、それぞれしきい値を設け、しきい値以上の波形のみを再現するようなウェーブレット係数を抽出した。これらのウェーブレット係数からきず波形を構成し、さらに、低周波数成分 A_4 と組合せて、図 16 に示すきず波形を再構成した。

図 16 の再構成後の波形は、図 7 の原波形と比べて 1Hz 以上の雑音信号が除去されており、きず波形の検出が容易となっているのがわかる。また、カットオフ周波

数 5Hz のローパスフィルタ処理を施した図 8(a)の波形と比べるとバックグラウンド雑音が除去されており、カットオフ周波数 0.1Hz のローパスフィルタ処理を施した図 8(b)の波形と比べるときずの波形が保たれている。すなわち、従来のフィルタ処理と比較しても、きず波形の検出が容易となっているといえる。

4.3 SN 比の改善割合

これまでのウェーブレット解析及び線形ローパスフィルタ処理結果について、3.4 項の SN 比改善割合($R(S/N)$)の算出結果を表 2 に示した。

外面 5%のきず波形について見ると、ローパスフィルタで 3~4 倍の改善割合であったものが、離散ウェーブレット変換では約 6 倍、連続ウェーブレット変換では 124 倍~1747 倍と、明らかに SN 比が改善しているのがわかる。

一方、外面 2%のきず波形について見ると、ローパスフィルタで 3~4 倍の改善割合であったものが、離散ウェーブレット変換では約 4 倍と改善されているが、連続ウェーブレット変換では、該当信号がノイズよりも小さいままで、SN 比の改善は見られなかった。

5. 考察

5.1 ウェーブレット解析の効果

4 章で示した SN 比の改善割合の比較結果を見ると、ウェーブレット解析の方がフーリエ解析より改善されているのがわかる。離散ウェーブレット解析では、その効果は、約 1.4 倍である。

ウェーブレット解析の方が SN 比として良い結果が得られるのは、ウェーブレット解析の方がその原理としてきず部波形の検知性に優れているからである。

フーリエ解析では、解析対象信号が正弦波の重畠であると仮定し、その重畠している各周波数成分の係数を算出しているので、突変的な信号応答の高周波数を減衰させてしまい、結果としてきず部波形のピーク値が小さくなってしまう。

一方、ウェーブレット解析では、解析対象信号が局在波(マザーウェーブレット)の重畠であると仮定し、その重畠している周波数成分の係数を算出しているので、突変的な信号応答に対しては、基準とした局在波成分の相関が強くなり、きず部波形が減衰することなくピーク値が小さくなることもない。

すなわち、ウォーブリングノイズの減衰度合いが同じくなるように、両解析手法のパラメータを調整したとしても、ウェーブレット解析の方が、突変的な信号応答

の検知性に優れているため、良好な SN 比を示すことになる。

今回の評価により、以上のようなウェーブレット解析によるきず部波形検知性の優位性が、定量的に示せたといえる。

5.2 外面 2%きず波形の検出感度

前記したように外面 2%きず波形の検出は、連続ウェーブレット解析を用いても SN 比の向上が得られなかった。その原因として以下の 3 点を仮説として検討した。

①外面 2%きず波形の振幅が小さく、バックグラウンドノイズレベルと同程度である（図 7）ため。

②マザーウェーブレットとして外面 5%きず波形を用いたが、外面 2%きずと 5%きずの波形が異なっていたため、相関が小さく十分な効果が得られなかった。

③外面 2%きず波形はバックグラウンドノイズと波形が類似しており、図 13(a)に示すように外面 2%きず波形の相関強度とバックグラウンドノイズの相関強度が同程度となっている。そのため、ノイズから分離することができず、十分な効果が得られなかった。

上記の①～③の仮説を検証するために、次に示す(1)及び(2)の追加解析を行った。この追加解析により、外面 2%きずが検出できなかった原因として①、②は該当しないことがわかった。ゆえに、その原因は③によるものと考えられる。

(1) きず信号の強度による検出感度

外面 5%きず波形を、0.4 倍、0.3 倍、0.2 倍し、これにバックグラウンドノイズを重畳する（図 17(a)）。このデータを解析対象として、マザーウェーブレットには外面 5%きず波形（図 12(b)）を用い、連続ウェーブレット変換及び再構成を行う。この結果を図 17(b)に示した。

外面 5%きず波形を 0.2 倍した信号については検出できなかったが、外面 2%きず波形の振幅に対応する 0.3 倍の波形については検出が可能であった。

ゆえに、外面 2%きず波形が検出できなかった原因として、①は適当でないことが確認された。

(2) きず信号形状の検出感度

マザーウェーブレットとして、外面 5%のきず波形のかわりに外面 2%のきず波形を用いて、連続ウェーブレット解析を行う。この結果を図 18 に示した。

同図より、外面 2%きず波形をマザーウェーブレットに用いても、検出感度の向上は見られないことがわかる。

ゆえに、②についても、外面 2%きず波形が検出できなかつた原因ではないことが確認できた。

5.3 連続解析と離散解析の相違

離散ウェーブレット解析では外面 2%きず波形を検出できたが、連続ウェーブレット解析では検出できなかつた。

離散ウェーブレット解析では、(3.4) 式で示される低周波数成分 $A_j(x)$ と高周波数成分 $D_j(x)$ に分解したのち、ウェーブレット係数を選択する。すなわち、周波数成分ごとに異なつた強度による選択が可能である。一方、連続ウェーブレット解析では、離散ウェーブレット解析のようには、周波数帯ごとにしきい値を設定出来ない。この解析過程の相違が、外面 2%きず波形の検出における差として現れたと考えている。

6. おわりに

高速炉プラント蒸気発生器伝熱管における渦電流探傷信号データにウェーブレット解析技術を適用し、伝熱管のきずを検出するための SN 比改善の可能性を評価した。

その結果、ウェーブレット解析により SN 比を数倍程度改善できることがわかつた。また、この改善効果を従来の線形フィルタと比較しても、高い効果が得られることがわかつた。例えば、離散ウェーブレット解析では、その効果は、ローパスフィルタを用いた結果の約 1.4 倍であった。

ウェーブレット解析は、従来のフーリエ解析と比較して、突変的な信号応答の検出能力が優れている。本研究により、高速炉プラントの蒸気発生器伝熱管探傷時に生ずるノイズ環境下のきず部波形検知に関しても、このようなウェーブレット解析の有効性が定量的に示せた。

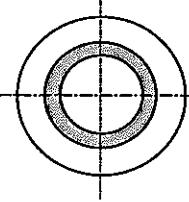
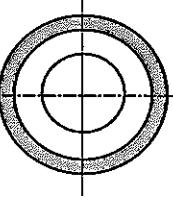
なお、本研究の評価ケースではきず部波形の評価数が少ないので、今後、種々のきず幅に対する検知性を評価するなどの検討が必要である。

参考文献

- [1] 原子力発電所の定期点検の手引き, 火力原子力発電技術協会(1992).
- [2] 山口良一, 他 3 名: 集束型渦電流探傷プローブの開発研究, INSS JOURNAL, No.3 , pp.161~pp.167(1996).
- [3] 門谷光人, 中越哲浩: 渦電流探傷検査解析支援システム, 火力原子力発電, No.515, Vol.50, pp.42~pp.49(1999).
- [4] 森岡茂, 他 5 名: PWR の蒸気発生器伝熱管検査技術の信頼性実証試験, 火力原子力発電, No.513, Vol.50, pp.28~pp.35(1999).
- [5] 梅本明, 斎藤伸一: 保温材下の配管腐食状況の渦電流探傷による非破壊検査, 火力原子力発電, No.513, Vol.50, pp.62~pp.49(1999).
- [6] R. C. McMaster, et al.: Nondestructive Testing Handbook, American Society for Nondestructive Testing(1986).
- [7] D. J. Hagemeyer : Fundamentals of Eddy Current Testing, American Society for Nondestructive testing(1990).
- [8] 石井勇五郎: 非破壊検査工学, 産報(1973).
- [9] 仙田富男: 非破壊検査マニュアル, 日本規格協会(1980).
- [10] 発電所の建設・試運転と運転保守, 火力原子力発電技術協会(1995).
- [11] G. Strang, T. Nguyen : Wavelets and Filter Banks, Wellesley-Cambridge Press(1996).
- [12] S. Mallat : A Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press(1997).
- [13] J. J. Benedetto, M. W. Frazier : Wavelets Mathematics and Applications, CRC Press(1994).
- [14] C. J. Park, et al. : Wavelet Transform Decomposition and Denoising for Reactor Monitoring, Trans. Am. Nucl. Soci., Vol.76, pp.345~pp.347(1997).
- [15] 大賀幸治, 他 2 名: 原子力プラント異常診断システム, 日本機械学会動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, Vol.6, No.98-17, pp.169~pp.170(1998).
- [16] 大谷暢夫: 臨界近接警報の為の中性子雑音のウェーブレット解析, 日本原子力学会 1996 秋の大会要旨集, pp.205(1996).
- [17] 林喜治, 大賀幸治: プラント異常検知診断のためのウェーブレット変換方式の開発, 日本原子力学会 1996 秋の大会要旨集, pp.279(1996).
- [18] 林喜治, 他 4 名: 原子力発電プラントセーフティサポートシステム要素機能の試作(1) - 異常予知総合判断技術 -, 日本原子力学会 1996 秋の大会要旨集, pp.306(1996).

- [19] 林喜治, 大賀幸治: ウエーブレット変換及びカオス理論によるプラント異常検知診断方式の開発, 日本原子力学会 1997 秋の大会要旨集, pp.411(1997).
- [20] A. Ikonomopoulos, A. Endo : A Wavelet Estimation of Probability Density Function Related to FBR Monju States, 日本原子力学会 1998 秋の大会要旨集, pp.332(1998).
- [21] 近藤昌也, 他 2 名: もんじゅ温度計ウェルの流力振動に関するウェーブレット解析, 日本原子力学会 1998 秋の大会要旨集, pp.411(1998).
- [22] 辻雅司, 島津洋一郎: JCO 臨界事故動特性解析, 日本原子力学会 2000 春の年会要旨集, pp.428(2000).
- [23] N. Hesham, et al. : Applicability of Wavelet Theory for the Neutron Flux Calculations, 日本原子力学会 2000 春の年会要旨集, pp.434(2000).
- [24] 勝又陵介, 島津洋一郎: Wavelet 変換による減速材温度係数評価における感度解析, 日本原子力学会 2000 春の年会要旨集, pp.715(2000).
- [25] G. Chen, et al. : A Novel Signal Processing Technique for Eddy-Current Testing of Steam Generator Tubes, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol.34, No.3, pp.642 ~pp.648(1998).
- [26] 陳鋼珠, 他 3 名: ウエーブレット解析の渦電流探傷法への適用, 火力原子力発電, Vol.49, No.12, pp.1689~pp.1706(1998).
- [27] S. Kumano, et al. : 2D Wavelet Filter for Rotating Eddy Current Signal, 高速信号処理応用技術学会誌, Vol.2, No.4, pp.25~pp.31(1999).
- [28] 八阪享介, 他 3 名: ウエーブレット変換を用いた配管からのリーク検出, 日本機械学会関西支部定時総会講演会講演論文集, Vol.254, No.954-4, pp.168~pp.170(1995).
- [29] 八阪享介, 他 3 名: ウエーブレット変換を用いた配管からのリーク検出, 日本機械学会関西支部定時総会講演会講演論文集, Vol.71, No.964-1, pp.27~pp.28(1996).
- [30] 渦流探傷試験Ⅱ, 日本非破壊検査協会, pp.68~77(1995).

表1 試験片の人工きず形状

人工きずの種類		長さ a (mm)	深さ* b (%)
きず内面全周		10	5 1
きず外面全周		10	10 5 2

*深さ:管肉厚に対する割合で示す

表2 SN比の改善割合

解析対象波形		線形ローパスフィルタ		ウェーブレット解析			
		Cut-off周波数		連続変換 マザーウェーブレット		離散変換 マザーウェーブレット	
		5Hz	0.1Hz	外面5%きず部波形	Haar関数	Mexican Hat関数	5次Daubechies関数
		図7	図8(a)	図14(a)	図14(b)	図14(c)	図16
外面 き ず 5 %	SN比	4.4	15.9	19.3	7687.8	546.2	7348.0
	SN比改善割合	-	3.3	4.4	1746.8	124.1	1669.6
外面 き ず 2 %	SN比	1.5	4.1	5.9	*	*	*
	SN比改善割合	-	2.8	4.0	*	*	*

* S<Nなので算出せず

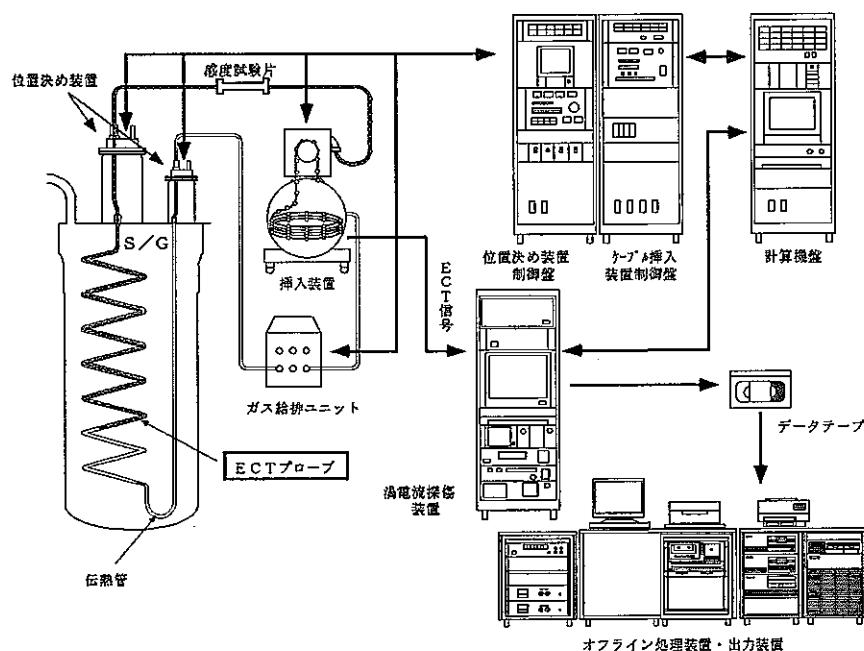


図1 漶電流探傷装置の概要

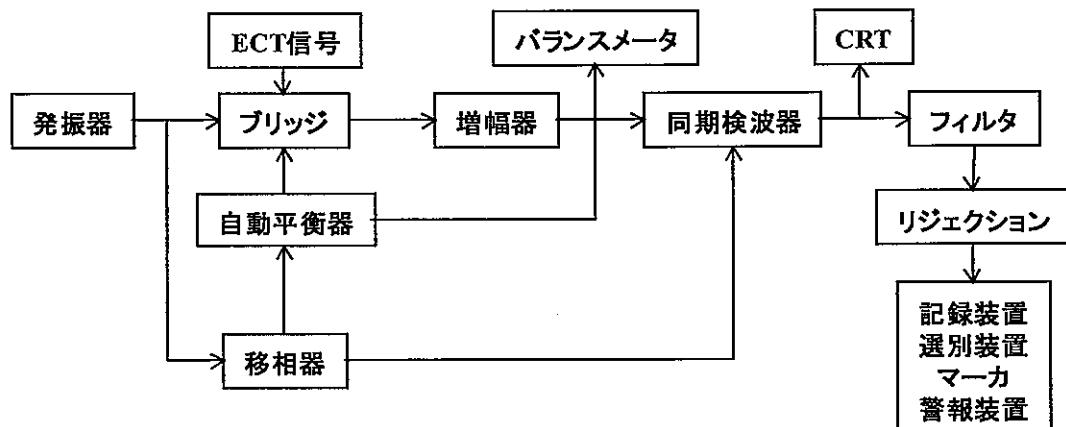


図2 漶電流探傷回路の基本構造

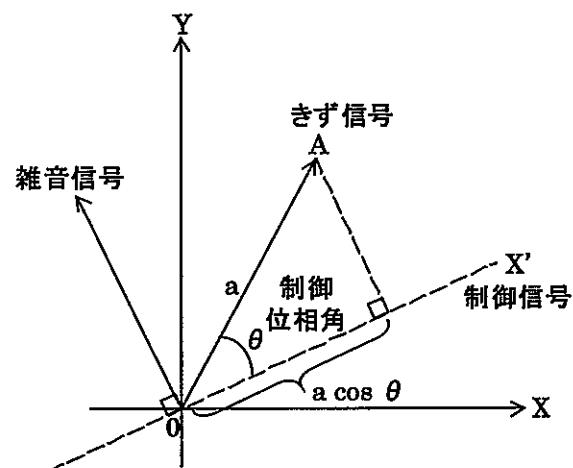


図3 同期検波

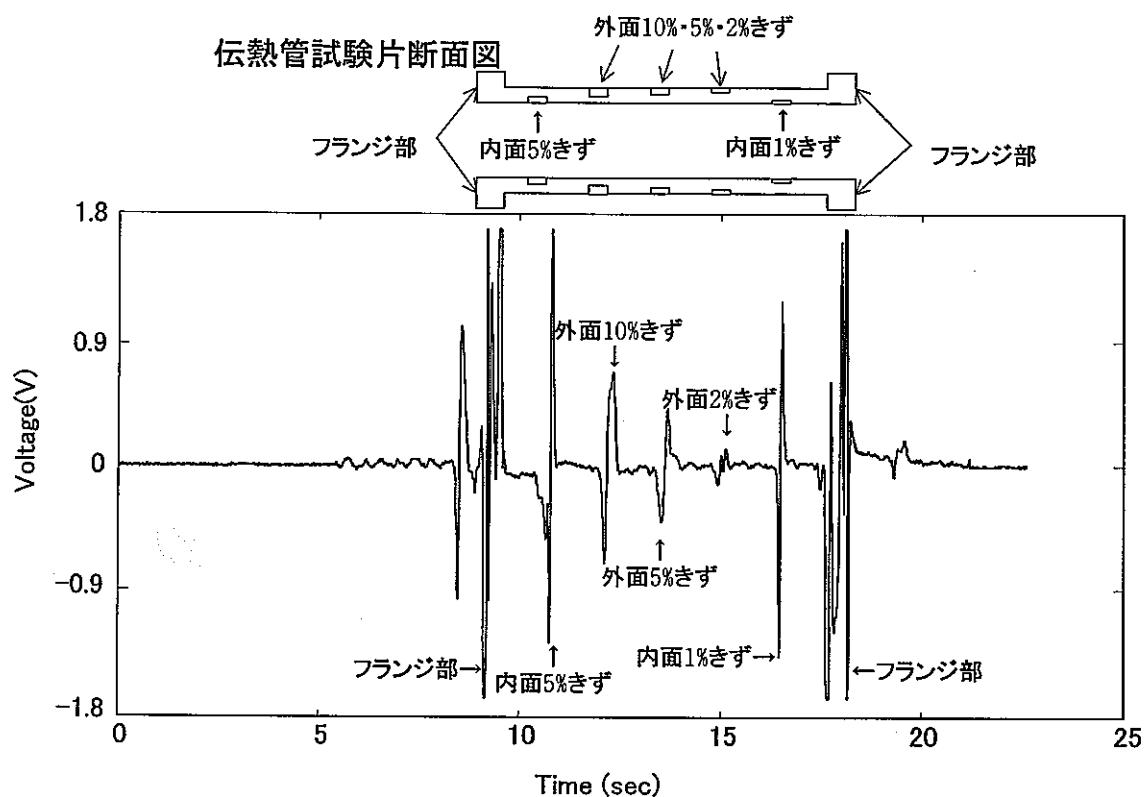


図4 伝熱管試験片の渦電流探傷信号

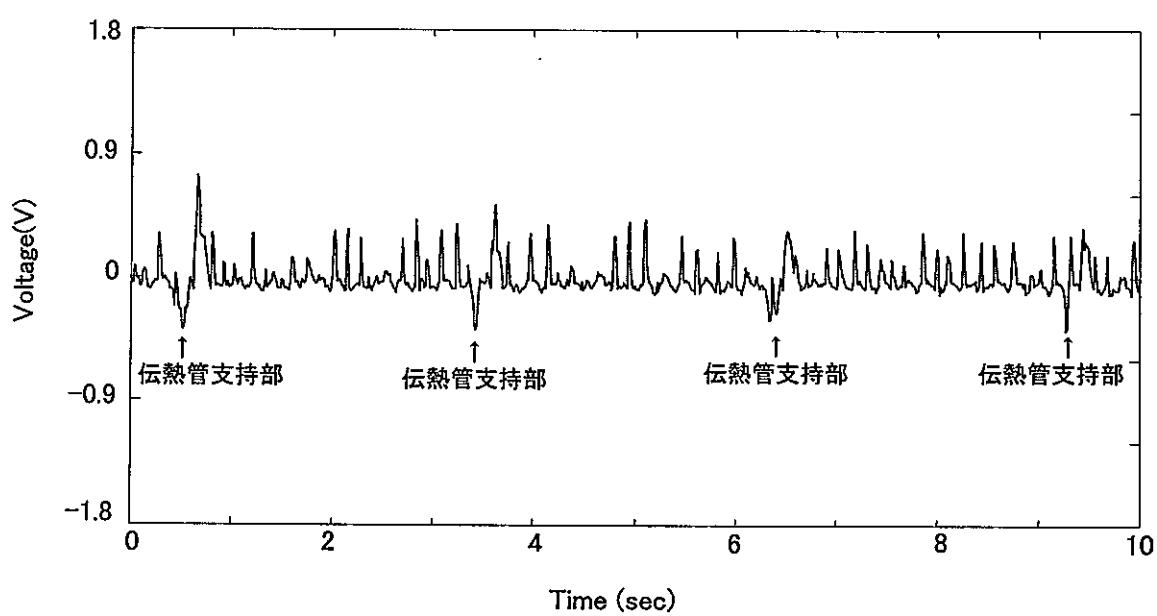


図5 渦電流探傷におけるバックグラウンドノイズ

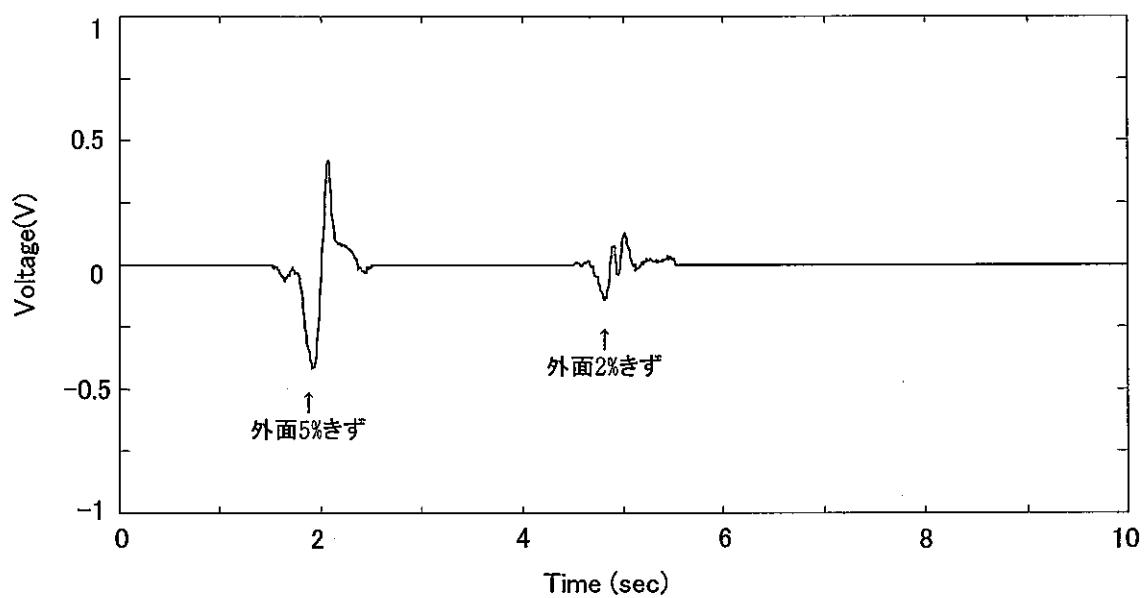


図6 評価に用いる渦電流探傷データの抽出

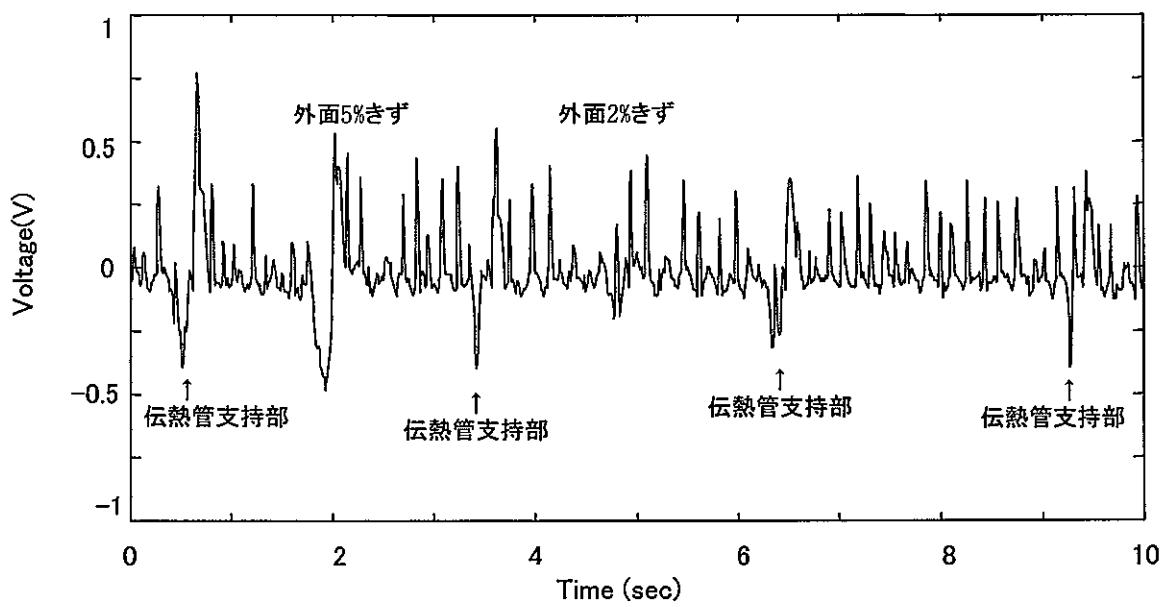
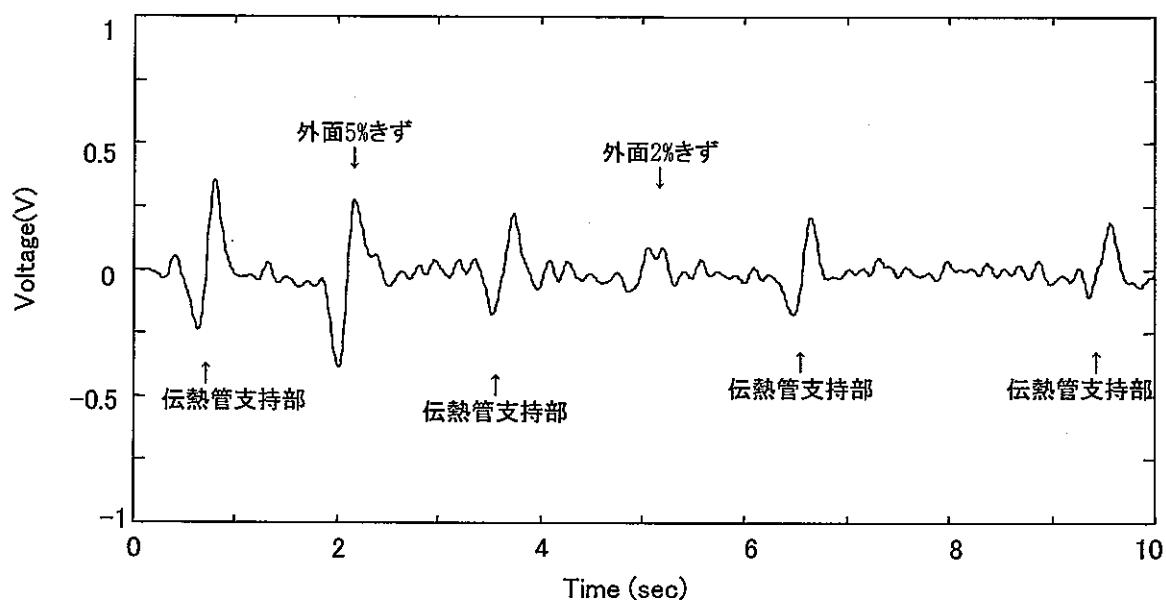
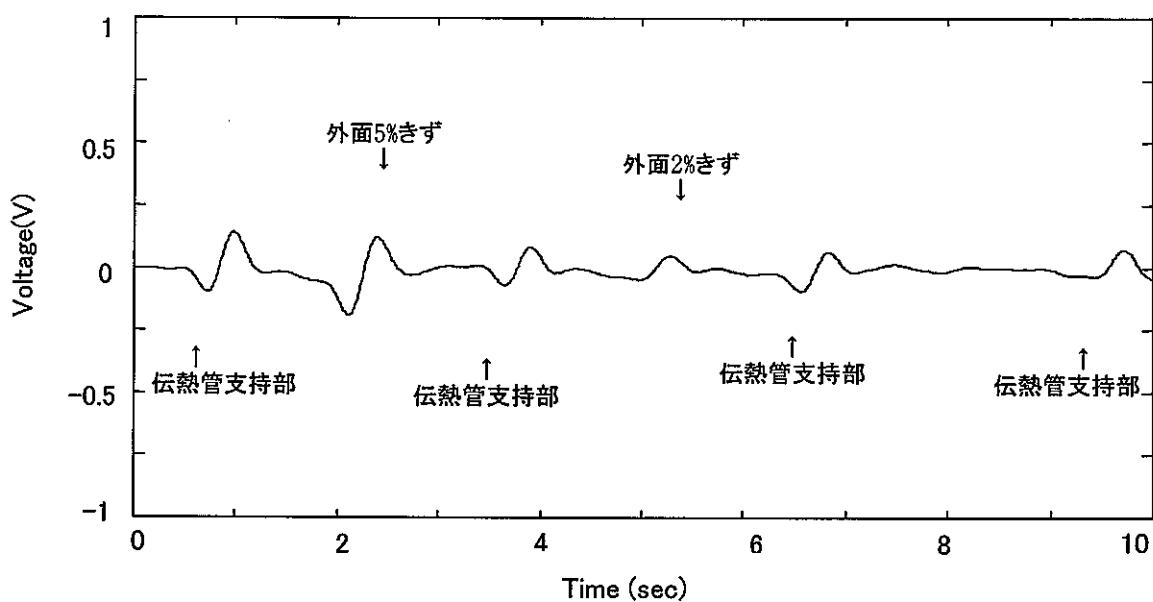


図7 評価用に人工合成した渦電流探傷データ



(a) Cut-off周波数5Hz



(b) Cut-off周波数0.1Hz

図8 ローパスフィルタの効果

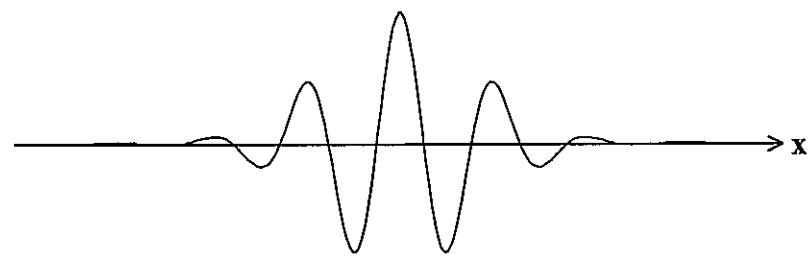


図9 ウェーブレット

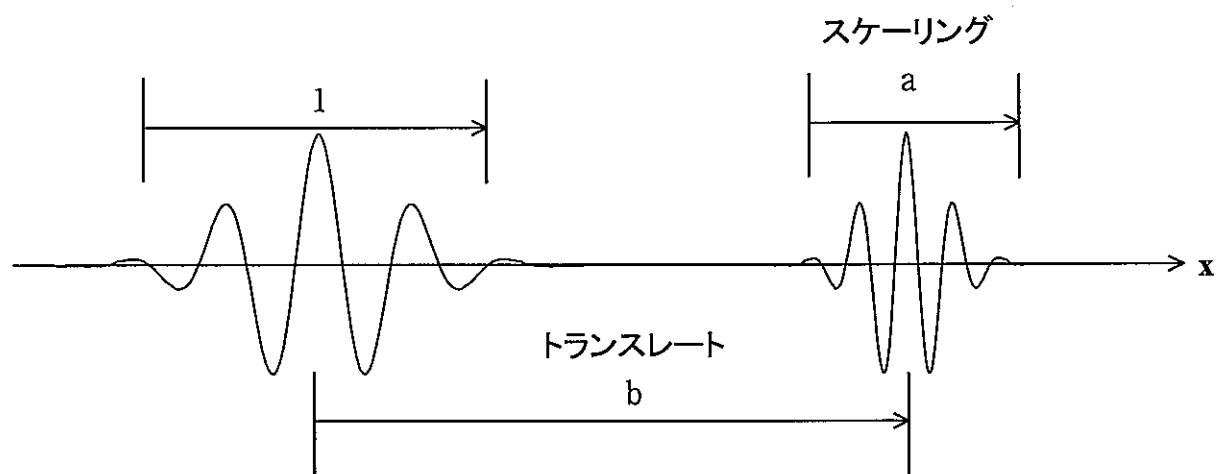
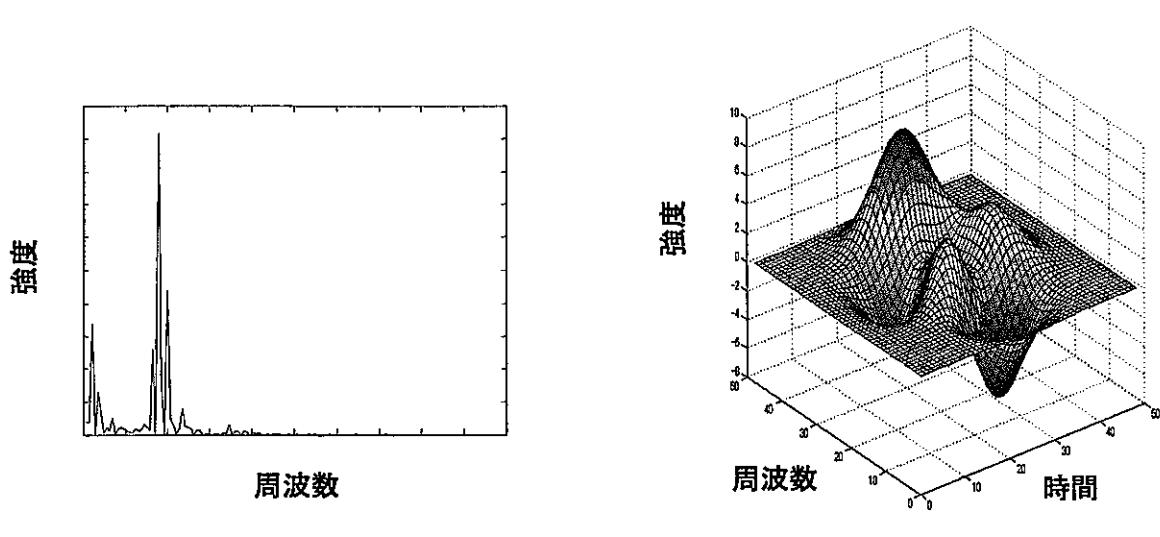


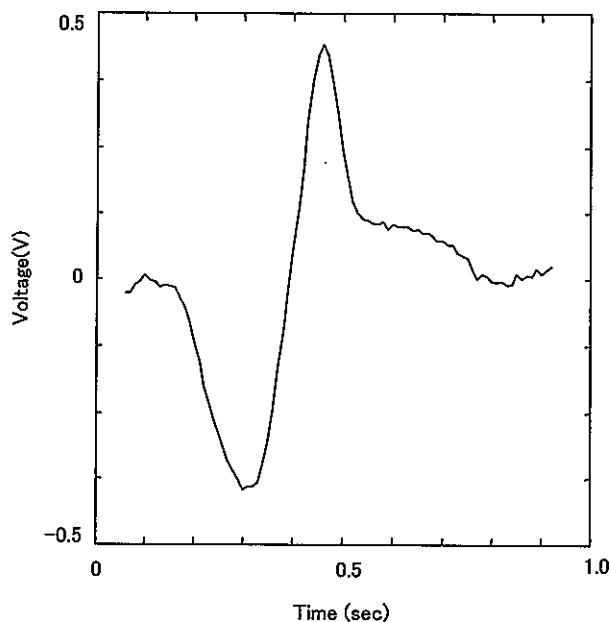
図10 マザーウェーブレットのトランスレート及びスケーリング



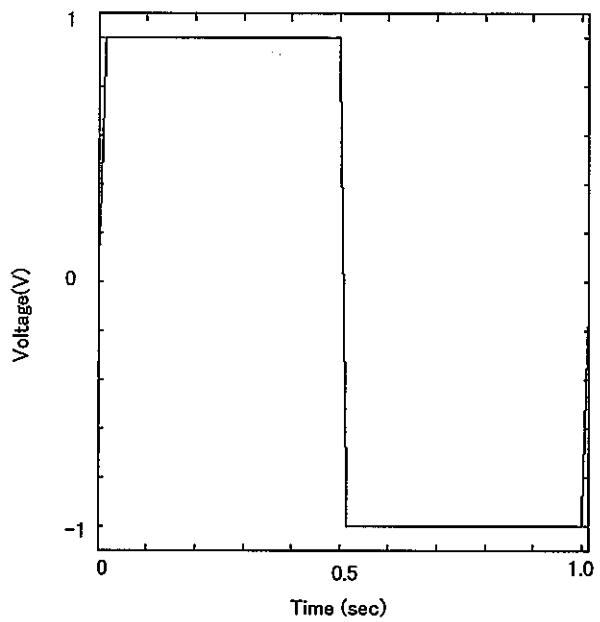
(a) フーリエ解析

(b) ウェーブレット解析

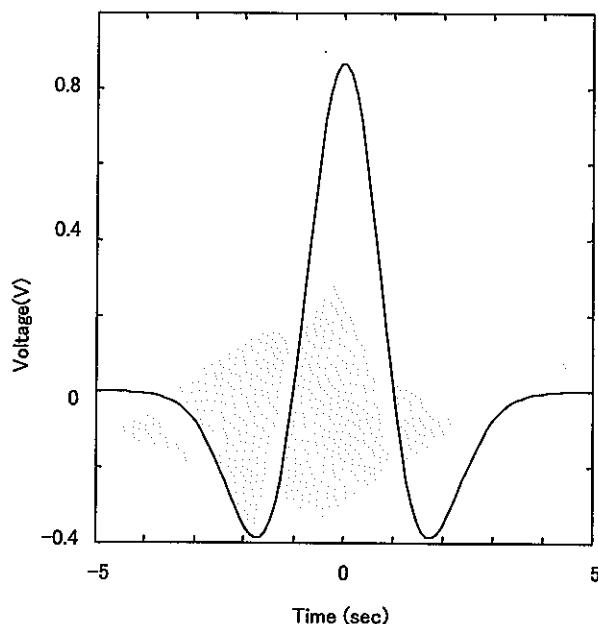
図11 信号平面概念図



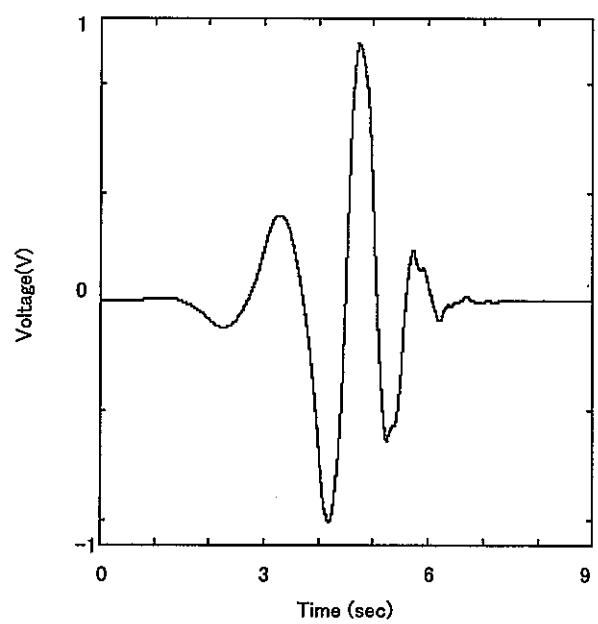
(a) 外面5%きずの波形



(b) Haar関数

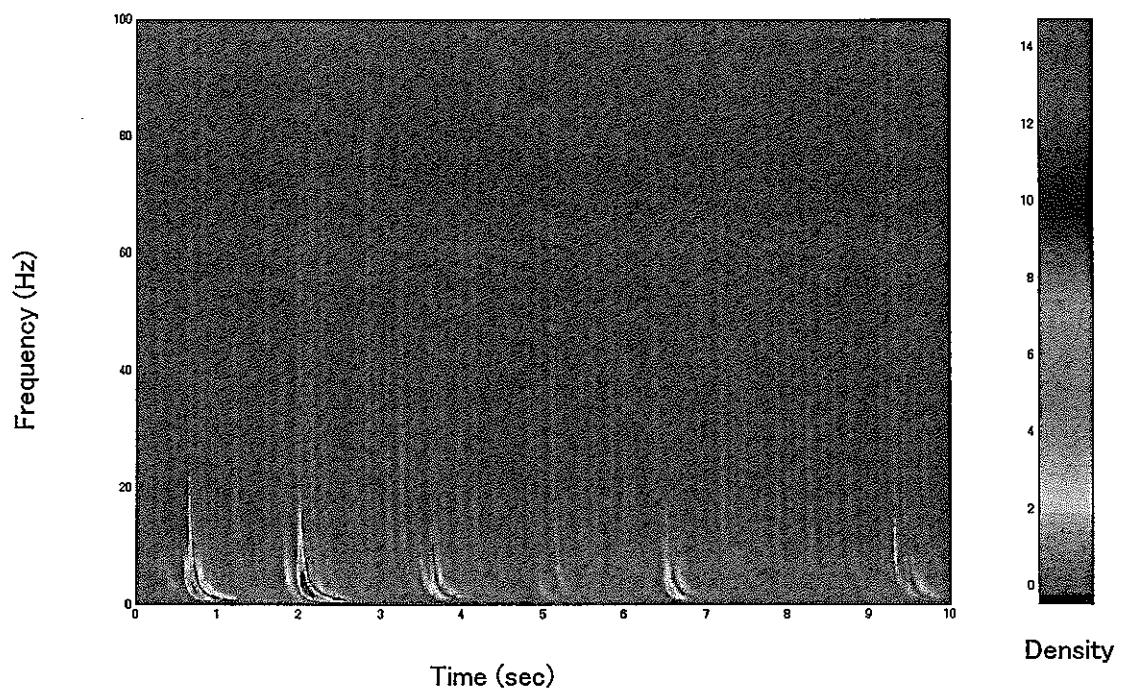


(c) Mexican Hat関数

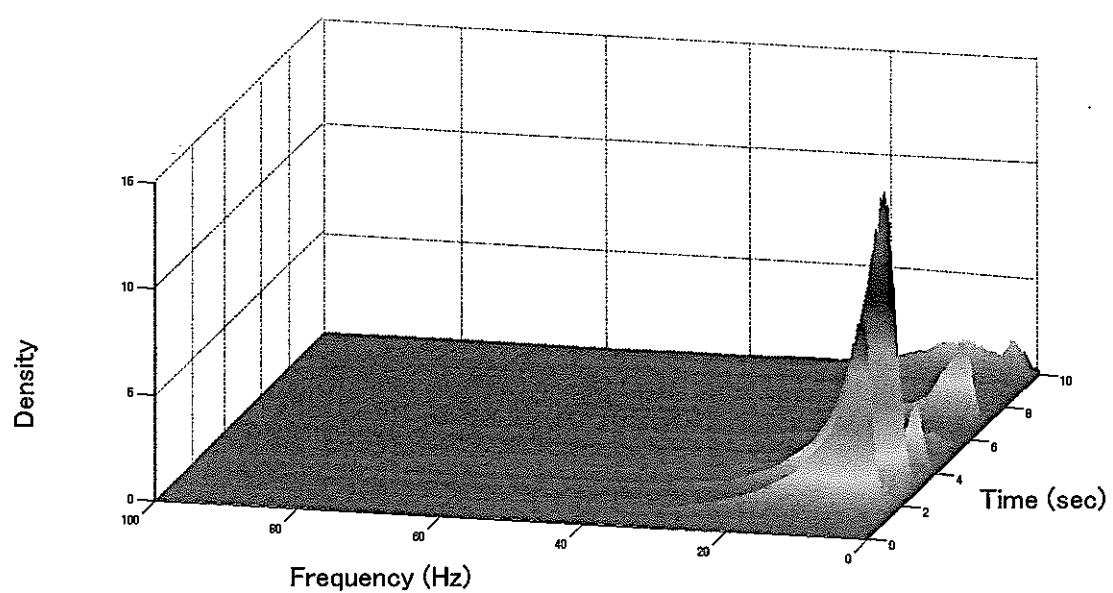


(d) 5次のDaubechies関数

図12 本報告書で用いたマザーウェーブレット波形

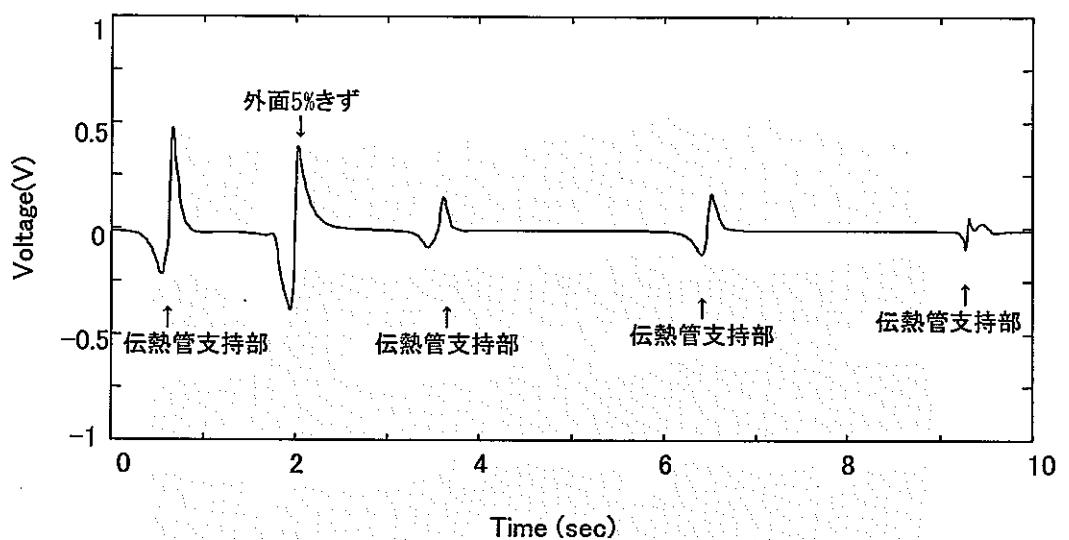


(a) 信号平面図による表現

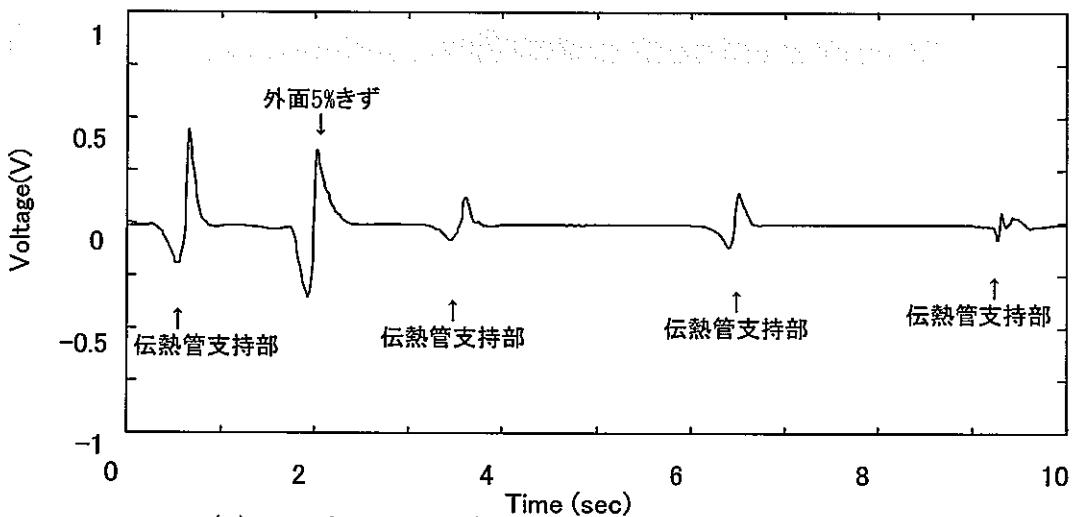


(b) 3次元表示

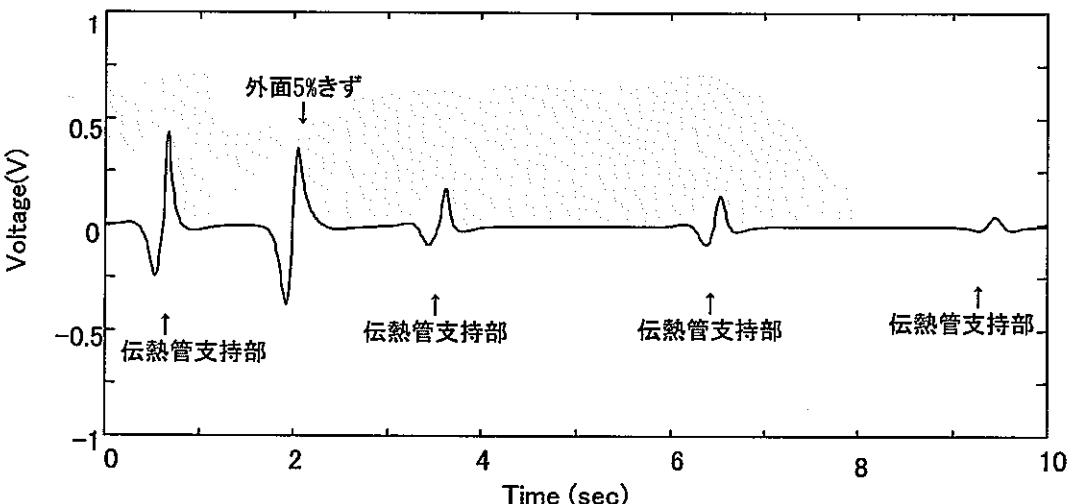
図13 連続ウェーブレット変換の結果



(a) マザーウェーブレットとして外面5%きず波形を用いた場合



(b) マザーウェーブレットとしてHaar関数を用いた場合



(c) マザーウェーブレットとしてMexican Hat関数を用いた場合

図14 連続ウェーブレット変換・再構成による結果

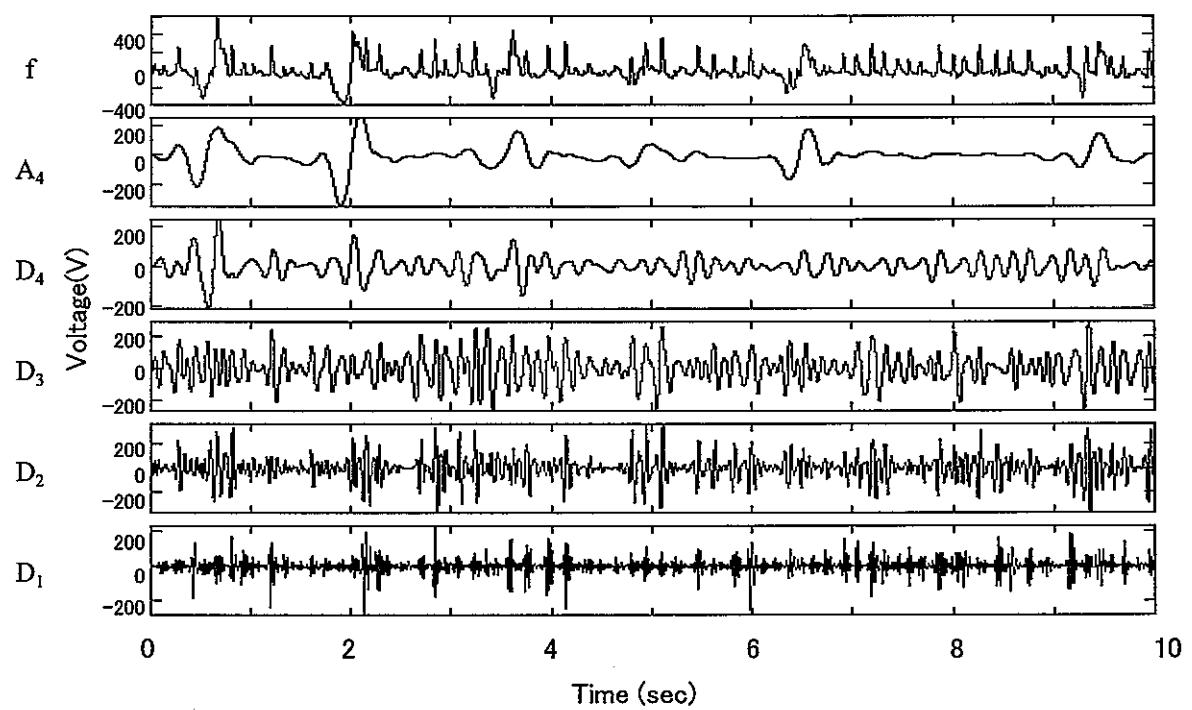


図15 離散ウェーブレット変換の結果

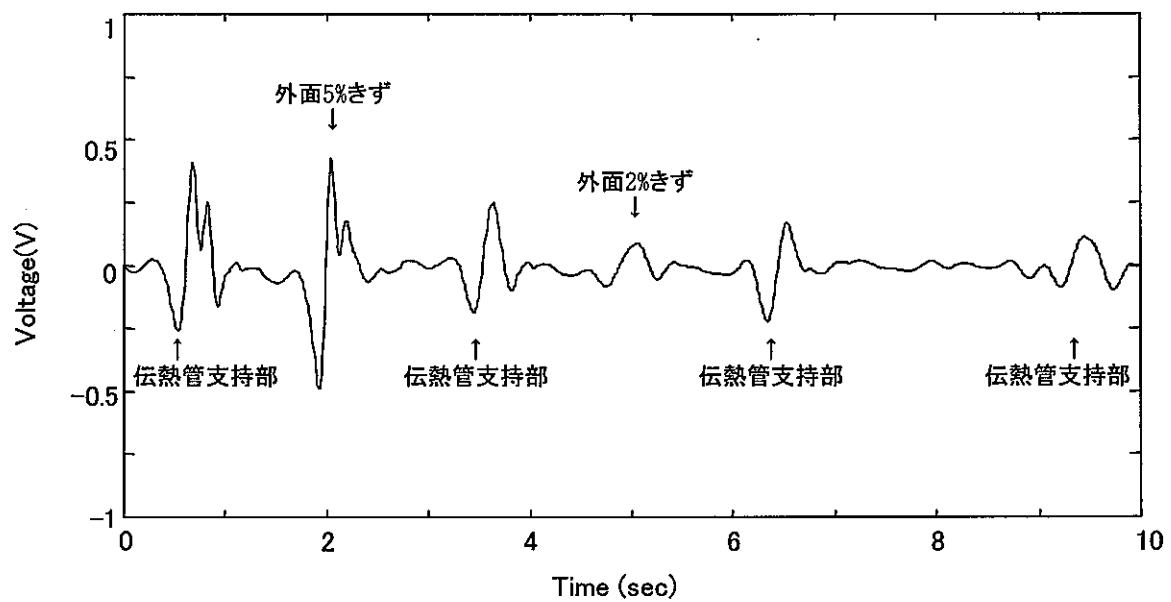
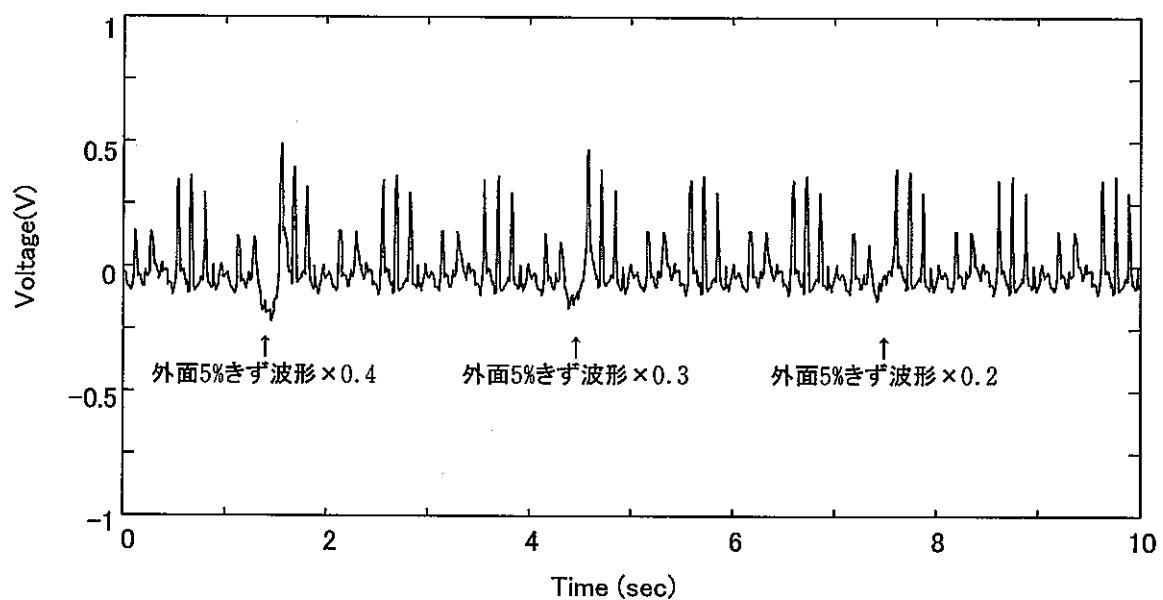
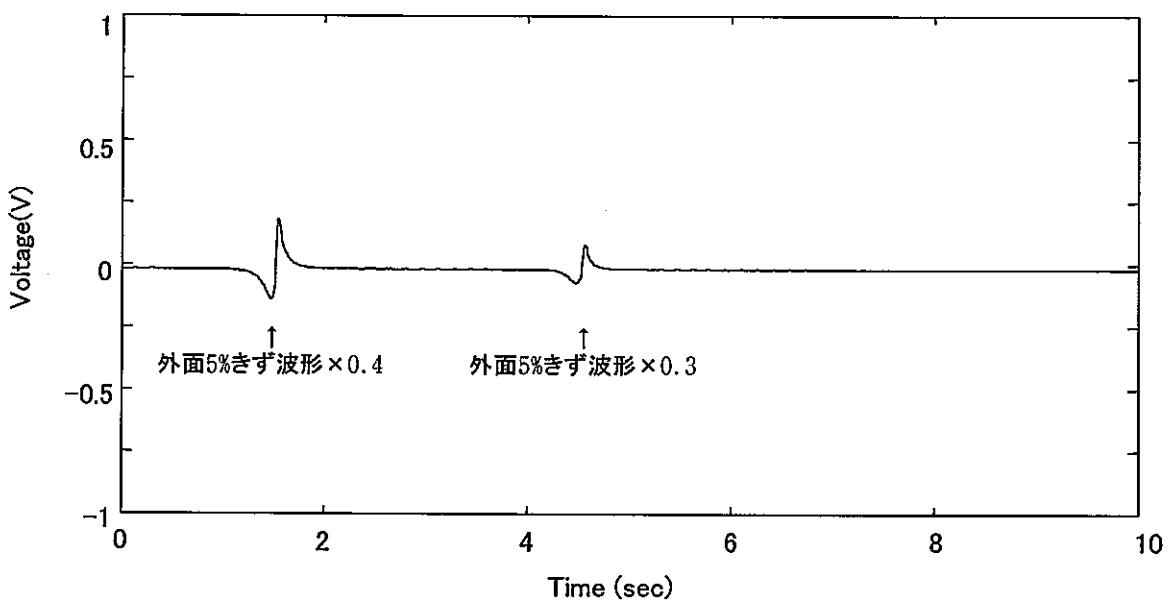


図16 離散ウェーブレット変換・再構成による結果



(a) 解析対象とする合成波形



(b) 連続ウェーブレット変換・再構成による結果

図17 きず波形強度の影響を評価

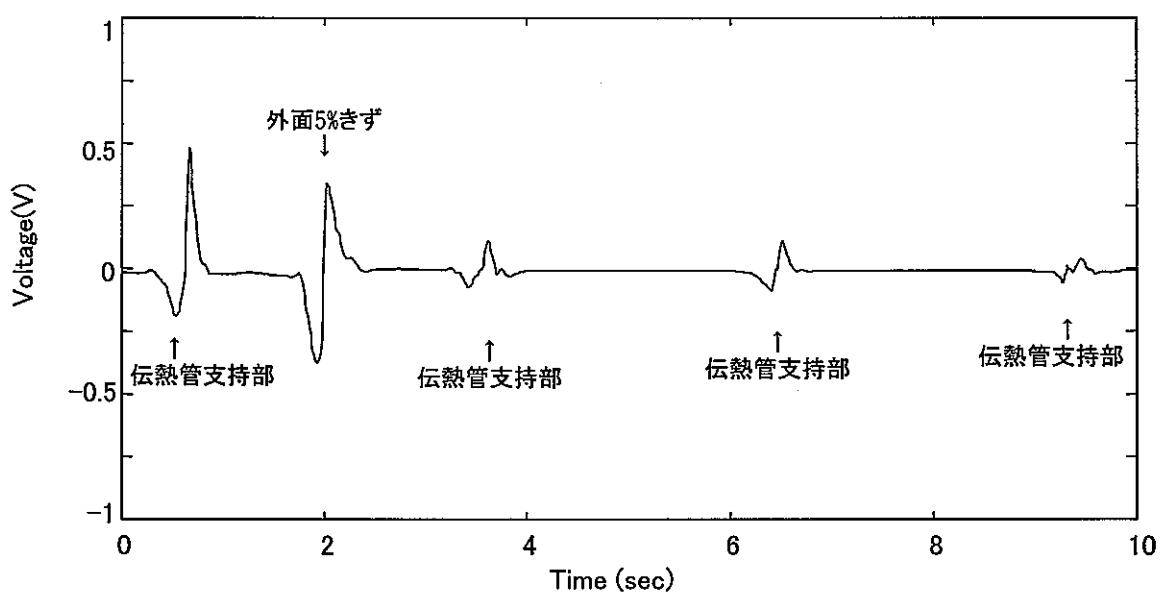


図18 連続ウェーブレット変換・再構成による結果
(外面2%きず波形をマザーウェーブレットに用いた解析)