

信号位相を利用した ECT 信号からのき裂指示の抽出

Extraction of crack indications from ECT signals by using signal phase characteristics

東北大学流体科学研究所	山本 敏弘	Toshihiro YAMAMOTO	Non-member
東北大学大学院工学研究科 [†]	八島 建樹	Kenji YASHIMA	Non-member
東北大学流体科学研究所	高木 敏行	Toshiyuki TAKAGI	Member
東北大学流体科学研究所	内一 哲哉	Tetsuya UCHIMOTO	Member

This paper shows phase characteristics of crack indications obtained with a multi-coil ECT probe, and proposes a method to reduce noise and extract crack indications from the detection signals of this multi-coil ECT probe based on these phase characteristics. Because this multi-coil ECT probe performs two kinds of scanning patterns: U-scan and T-scan, and obtains two sets of signal distributions for one scanning area simultaneously, the proposed method uses a two-stage process that includes so-called a main filter and a sub filter. While the main filter uses the phase information of the same scanning pattern by which the target signals are obtained, the sub filter uses the phase information of the other scanning pattern for the target signals. Using these two filters imposes more strict conditions on extracting crack indications so as to reduce more noise.

Keywords: eddy current testing, multi-coil probe, crack detection, noise reduction

1. はじめに

渦電流探傷試験(Eddy Current Testing, ECT)は、電磁現象を利用した非破壊検査手法の一つであり、コイルで発生させた交流磁場により導体である試験体に渦電流を誘導させ、試験体内に欠陥が存在するときには渦電流の流れが変化することにより欠陥の検出を行う[1,2]。ECT では、この様な電磁誘導を利用するため、プローブを試験体に接触させる必要が無く、また試験結果が電気信号として得られ、高速な探傷が可能である。これらの特長から、原子力発電設備における代表的な適用事例として、加圧水型原子炉の蒸気発生器伝熱管の検査があり[2,3]、その検査指針として、JEAG 4208-2005 がある[4]。

また、最近では、平成 19 年 9 月に定期検査中の関西電力・美浜発電所 2 号機において、蒸気発生器 1 次冷却材入口管台溶接部の内表面に対して、残留応力を低減させることを目的とするショットピーニングを実施する際に、事前の健全性確認のため ECT による検査を行ったところ、当該部において有意な信号指示が検出され、その後の詳細な検査でき裂が確認された。

これを始まりとして、敦賀 2 号機、高浜 2 号機、3

号機においても、蒸気発生器入口管台溶接部の内表面に対する ECT による検査で有意な信号指示が検出され、き裂が確認された[5]。このような経緯から、ECT の有用性が再認識され、現在、原子力発電設備の保全において、ECT の適用範囲が広がりつつある。

ECT では、検査を行う試験体において、欠陥がない位置で得られる検出信号を基準とし、これを試験体の他の各点で得られる検出信号と比較し、検出信号が変化した点に欠陥があると判断する。よって、検査位置に対する検出信号の分布において、信号変化が見られる位置がそのまま欠陥がある位置と考えられ、欠陥と検出信号の対応が直感的に分かりやすい結果が得られる。しかしながら、実際の試験対象では、複雑な形状や粗い表面による不規則なりフトオフの発生や溶接等の加工による材料の導電率または透磁率の変化が原因となり、検出信号に複雑なノイズが加わることによって欠陥の発見が困難となる。

本稿では、第 2 節で紹介するマルチコイル ECT システムにより得られるき裂指示の位相に関する特徴に着目し、同 ECT システムにおいて、上述のようなノイズを含む検出信号からき裂指示のみを抽出する方法について述べる。これにより、実際の応用において現れる複雑な検出信号からき裂位置を特定することを目標とする。

[†]現在、日本金属工業株式会社

連絡先: 山本敏弘 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 東北大学流体科学研究所 電話: 022-217-5298
e-mail: yamamoto@wert.ifs.tohoku.ac.jp

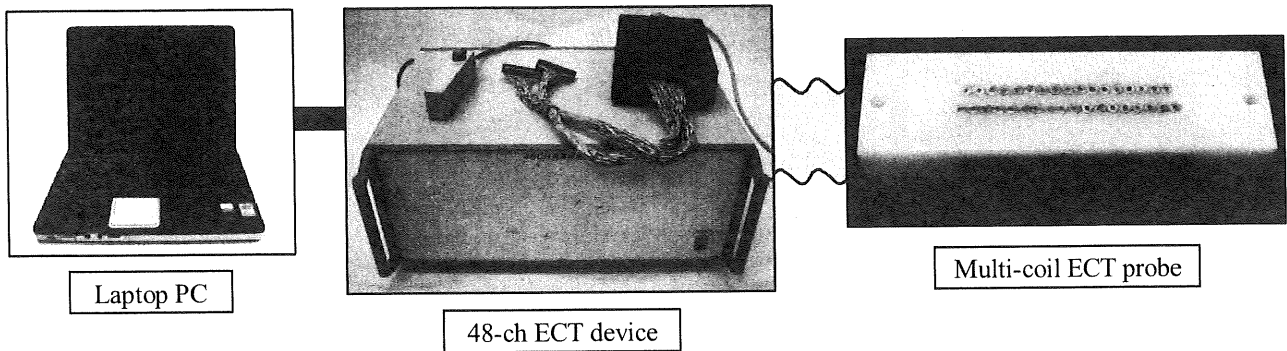


Fig. 1 48-channel ECT device

2. 48チャンネル渦電流探傷システム

本研究では、文献[6]の研究において開発された ECT システムを使用した。

2.1 システムの構成

Fig. 1 に使用した ECT システムの構成を示す。本 ECT システムは、探傷装置、プローブ、制御用のノート PC から構成される。

探傷装置には、アスワン電子 (株) 製の 48 チャンネル渦電流探傷装置 (型式: A-2017) を使用した。プローブは、探傷装置に合わせてアスワン電子 (株) により製作されたマルチコイル ECT プローブであり、Fig. 2 に示すように 2 つのコイル列を持ち、これらのコイル列はそれぞれ 17 個と 18 個のコイルで構成される。

プローブを構成するこれらのコイルは、48 チャンネル渦電流探傷装置により、各瞬間において 1 個が励磁コイルとして、1 個が検出コイルとして使用され、この励磁コイルと検出コイルの一つの組合せを 1 チャンネルとして、探傷装置のマルチプレクサ回路のスイッチング制御により各チャンネル間の相互干渉を回避しながら 48 チャンネルが使用される。

Fig. 3 において各矢印がチャンネルごとの励磁コイルと検出コイルの組合せを表しており、矢印は励磁コイルから検出コイルに向かっている。これらのチャンネルは、Fig. 3 が示すように T スキャンと U スキャンの 2 種類のスキャンパターンに分けられる。各スキャンパターンの最初と最後のチャンネル番号を Fig. 3 においてその検出コイルに付すことにより示す。

検出されるき裂指示は、き裂長手方向と励磁・検出コイルの並びの方向が一致するとき最も強く出るので、U スキャンで得られる検出信号はき裂長手方向がコイ

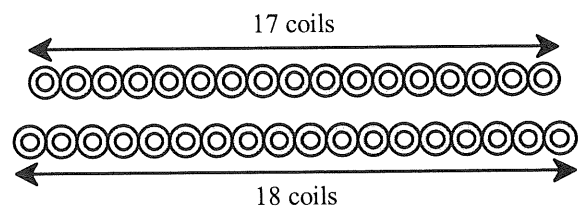


Fig. 2 Multi-coil ECT probe

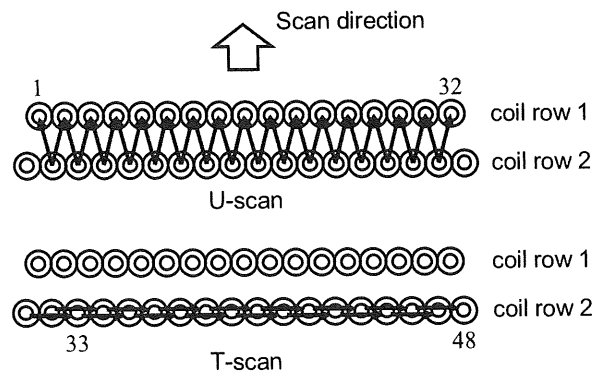


Fig. 3 Two types of scanning patterns

ル列に垂直なき裂の検出に、T スキャンで得られる検出信号はき裂長手方向がコイル列と平行なき裂の検出に使われる。1 回の走査において、これらの合計 48 チャンネルは順次切り替えながら使用され、チャンネルごとに検出信号が出力される。

探傷装置と LAN ケーブルで接続されたノート PC では、専用制御ソフトウェアにより探傷装置の動作を設定し、探傷装置から出力される U スキャンと T スキャンのそれぞれの検出電圧 (V_x 成分および V_y 成分) を受信する。これらの検出信号はノート PC のハードディスクにデジタル形式で保存される。

このマルチコイル ECT プローブでは、一方向の移動

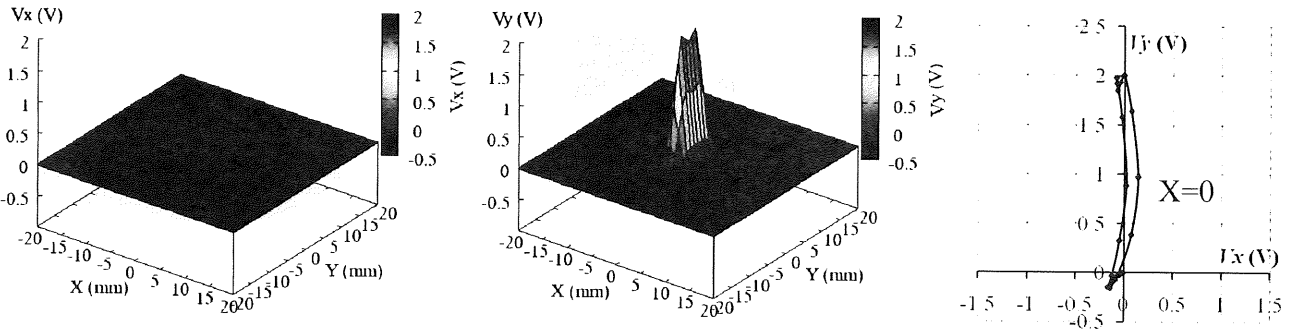


Fig. 4 Detection signals of 48-ch ECT device

で、コイル列幅の2次元領域が探傷でき、このとき保存された検出信号データは、各種グラフ作成ソフトウェアなどにより2次元画像として表示させることができる。

2.2 検出信号の性質

Fig. 4は、厚さ10 mmのステンレス鋼平板の表面にある幅0.3 mm、長さ10 mm、深さ2 mmの矩形欠陥の上を48チャンネル渦電流探傷装置により探傷したときに得られる検出信号分布を数値計算により再現したものである。左の2つはそれぞれ V_x と V_y 成分を3次元表示したもので、右はこれらの信号の $X=0$ 上のリサーチ波形である。プローブの走査方向に X 軸をとり、コイル列方向に Y 軸をとっており、コイル列方向のき裂を探傷したときのTスキャンによる検出信号に対応する。

プローブを構成するコイルについては、コイルの寸法が外径2.5 mm、内径1.0 mm、高さ2.5 mm、巻数520回であり、コイル列を構成するコイルの中心間隔は2.6 mm、2つのコイル列の中心間隔は4.6 mmであり、また、励磁周波数は100 kHzとした。

48チャンネル渦電流探傷装置より出力される信号は、チャンネル間の製造上のばらつきを補正し、また検出信号に比較対象となる基準を設けるために、SUS316ステンレス鋼平板上の深さ2 mmの全幅EDMスリットから得られるき裂指示を基準として、このき裂指示の成分が各チャンネルにおいて、信号振幅が最大の点で $(V_x, V_y)=(0, 2)$ と出力されるように、元の信号成分に掛けて調整するための複素定数をチャンネルごとに求め、これらの複素定数を常に探傷装置から出力される検出信号に掛けている（これは、き裂指示が V_y 成分に強く出るようにすることに対応する）。このとき、

それぞれのスキャンパターンに対して検出感度が良いき裂方向を基準とするために、Uスキャンではスリットがコイル列に垂直な場合を基準とし、Tスキャンではスリットがコイル列に平行な場合を基準とする。

Fig. 5に数値計算により求めたき裂深さの変化に対する検出信号の振幅と位相の変化を示す。厚さ10 mmのSUS316平板上にある幅0.3 mmの全幅EDMスリットの深さを1 mmから5 mmまで変化させ、これらに対する検出信号の振幅と位相をグラフにした。UスキャンとTスキャンのそれぞれについて、スリットがコイル列に垂直な場合と平行な場合の2通りの検出信号を求めた。

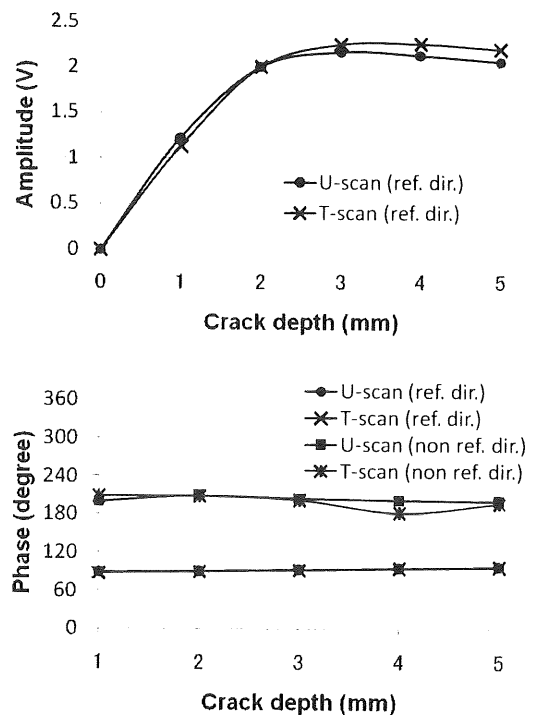


Fig. 5 Crack depth dependency of ECT signals

この結果から分かるように、このプローブではき裂深さが3 mm程度で振幅が飽和し、位相はUスキャンとTスキャンともに、それぞれ基準とする方向(ref. dir.)のき裂に対しては(0,2)の位相である90°から大きく変化せず、また同様に基準とは逆の方向(non ref. dir.)のき裂に対しては200°付近の値を持つことが分かる。

3. 信号位相を利用したき裂指示の抽出

ここでは、第2.2節で示した48チャンネル渦電流装置により得られるき裂信号の特徴を利用した、検出信号から不要なノイズを除去するための信号フィルタを紹介する。

Fig. 5から分かるように、き裂深さが変化してもき裂信号の位相は小さな範囲に収まることから、検出信号分布の中から位相が適切な位相範囲に含まれているもののみを取り出すことにより、き裂指示以外の信号を省くことができる。前述のように、基準方向のき裂信号の位相が90°になるように調整している場合、実際の信号では、き裂深さ、材質の変化、その他のノイズなどの要因で位相がずれることを考慮し、前後に30°の幅を持たせ、指定位相範囲を60°から120°とする。ただし、これは各スキャンパターンで基準方向のき裂指示のみを取り出すことを意味するので、Uスキャン信号からはコイル列と垂直な方向のき裂指示のみを、Tスキャン信号からはコイル列と平行なき裂指示のみを取り出すことになる。

これだけでも、ある程度のノイズを除去することが可能であるが、複雑なノイズの位相がたまたま指定位相範囲に入ることがあり、場合によっては広い範囲でノイズが残ることがある。そのため、上記の処理を拡張し、UスキャンとTスキャンともに基準とは逆の方向のき裂に対する検出信号の位相も別の小さな範囲に収まることを利用して、検出信号をき裂指示とみなす条件をさらに絞り込むことを考える。48チャンネル渦電流探傷装置では、一つの探傷領域に対してUスキャンとTスキャンの両方の検出信号が同時に得られることから、各スキャンパターンの検出信号からき裂指示を抽出する際に、同一のスキャンパターンの位相情報だけでなく、もう一方のスキャンパターンの位相情報を参照することにより、UスキャンとTスキャンのそれぞれ対し2種類の位相条件を課すことができる。

ここで、一方のスキャンパターンの振幅分布に対し

て、同一のスキャンパターンの位相分布を使用するフィルタを主フィルタ(main filter)とし、異なるスキャンパターンの位相分布を使用するフィルタを副フィルタ(sub filter)とする。主フィルタの指定位相範囲は、前述のように60°から120°とし、副フィルタの指定位相範囲は、Fig. 5のグラフを参考にして180°から240°とする。

また、副フィルタの処理において、異なるスキャンパターンの位相を参照するとき、プローブの走査方向にX軸をとり、コイル列方向にY軸をとった場合、各チャンネルから得られる検出信号は、励磁コイルと検出コイルの中央付近における試験体の状態の影響を強く受けるので、同一のプローブ位置でUスキャンとTスキャンはX方向に関して少しずれた場所を見ており、異なるスキャンパターンではX方向にずらして対応させる。また、UスキャンとTスキャンでは、チャンネルの数も構成も違うため、Y方向についても異なるスキャンパターンでのチャンネルの対応を与えなければならない。

4. 適用例

ここでは、48チャンネルECTシステムを使って実際の試験体から得られたノイズを含む検出信号に対して、第3節で提案したき裂指示の抽出方法を適用した結果を紹介する。

Fig. 6に示す、溶接部にEDMき裂を入れたSUS304平板を探傷し、その検出信号からき裂指示のみを取り出す。EDMき裂は、溶接に沿っているものと溶接を横切っているものの2種類があり、溶接線に沿っている方はTスキャンの検出信号から、溶接線を横切っている方はUスキャンの検出信号からそれぞれき裂指示を取り出した。プローブの仕様は、第2.2節のものと若干異なり、コイルの寸法が外径2.0 mm、内径1.0 mm、

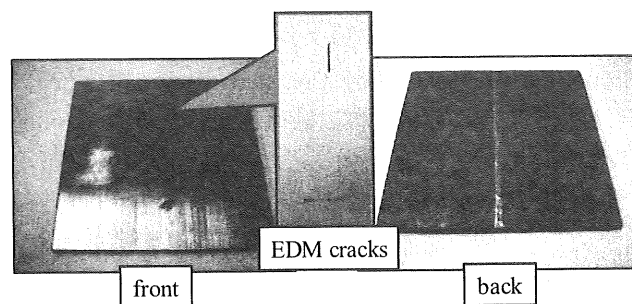


Fig. 6 EDM cracks in the weld line

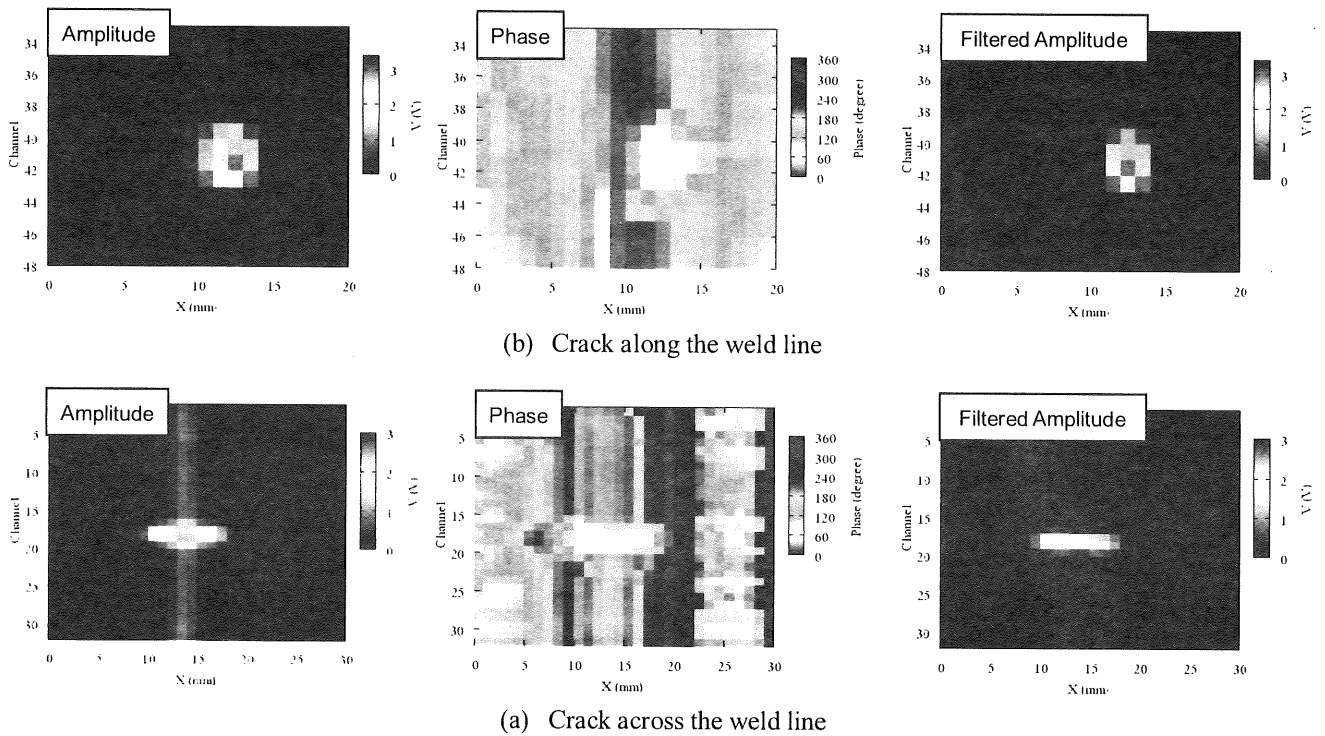


Fig. 7 Detection signals of 48-ch ECT device

高さ 2.0 mm、巻数 300 回であり、コイル列を構成するコイルの中心間隔は 2.4 mm、2 つのコイル列の中心間隔は 4.6 mm であり、励磁周波数は 100 kHz とした。

Fig. 7 は主フィルタのみを使用した結果である。左の 2 つは、それぞれフィルタ適用前の検出信号の振幅と位相分布であり、一番右がフィルタ適用後の振幅分布である。フィルタ適用前の振幅分布では、き裂指示とともに、縦に走る溶接線の指示が確認でき、位相分布からは、それらの信号位相の違いがはっきり見える。振幅が小さい領域では、少しのノイズで位相が大きく変化するため、複雑な位相分布を持つ傾向にある。そして、フィルタ適用後の振幅分布からは、き裂指示のみが取り出せたことが分かる。

Fig. 8 は、米国原子力規制委員会(USNRC)が主催する国際共同研究プロジェクト PINC (Program for the Inspection of Nickel-alloy Components)の一環として行われた、異種金属溶接部試験体を用いたラウンドロビン試験において、本 ECT システムにより得られた 2 つの探傷領域の検出信号である (プロジェクトの詳細については紹介記事[7]を参照されたい)。こちらは、すべて振幅分布であり、左からフィルタ適用前、主フィルタのみ適用、主・副フィルタを適用の順で並んでいる。プローブの仕様は第 2.2 節のものと同じで、励

磁周波数は 100 kHz である。

このラウンドロビン試験で使われた試験体の溶接部には応力腐食割れ(SCC)が入っているとされているが、き裂位置はまだ公開されておらず(2008年5月現在)、現状ではこの結果から適切な評価はできないが参考として掲載する。

この結果では、主フィルタだけではノイズが取りきれず、主・副の 2 つのフィルタによりき裂指示と思われる単純な信号のみを取り出すことができた。

基本的な概念では、主フィルタのみでかなりのノイズが除去できると考えられるが、実際には、き裂指示の位相に近い位相を持つノイズが検出されたり、また、き裂指示自体も様々な要因で基準と若干ずれた位相を持ったりするため、主フィルタのみでは決定的にノイズを取りきれないことがあり、その場合、さらに抽出条件を絞れる副フィルタが有用となる。

5. まとめ

本稿では、48 チャンネル ECT システムにより得られるき裂指示の信号位相の性質を示し、その特徴から、信号位相に着目して検出信号からノイズを除去し、信号指示のみを抽出する方法を紹介した。

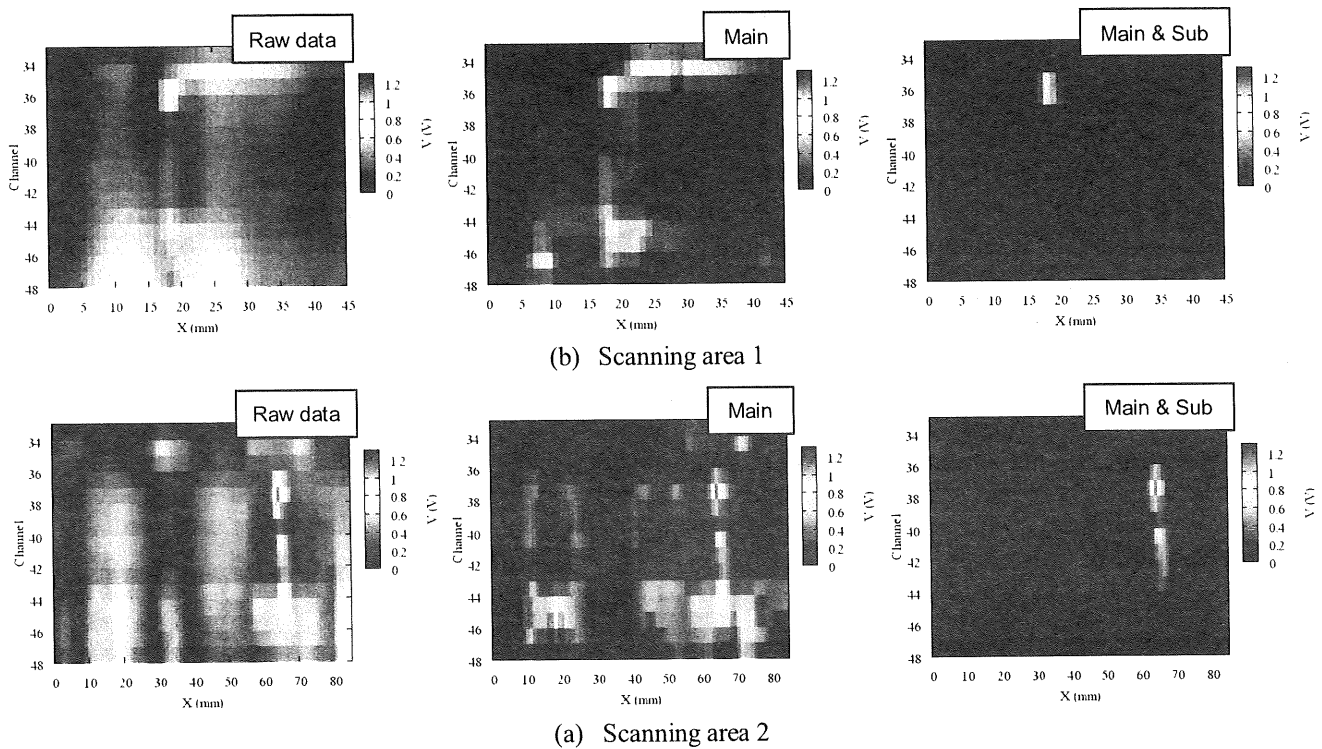


Fig. 8 Detection signals of 48-ch ECT device

信号振幅と同一のスキャンパターンの位相を利用した主フィルタと、信号振幅とは別のスキャンパターンの位相を利用する副フィルタの2つのフィルタについて考え、検出信号をき裂指示と判断する条件を厳しくすることにより、き裂指示に似たノイズを除去する方法を提案した。

参考文献

- [1] (社)日本非破壊検査協会, 非破壊検査技術シリーズ 渦流探傷試験 III (2003)
- [2] 池田忠夫, 渦流探傷技術の保守検査への適用例, 非破壊検査, Vol. 49, No. 3, pp. 176-182 (2000)
- [3] 高松洋, 宮健三, 陳振茂, 加圧水型原子力発電所における電磁非破壊検査技術開発の経緯, 日本 AEM 学会誌, Vol. 8, No. 1, pp. 95-101 (2000)
- [4] (社)日本電気協会, 軽水型原子力発電所用蒸気発生器伝熱管の供用中検査における渦流探傷試験指針, JEAG 4208-2005 (2005)
- [5] 原子力安全・保安院, 蒸気発生器一次冷却材出入口管台溶接部内表面におけるき裂への対応について (解説), 原子力安全・保安院 報道発表 (Feb. 5, 2008)
- [6] 西水亮ほか, 複雑形状部検査のための渦電流探傷システムの開発, 日本原子力学会誌和文論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 142-151 (2008)
- [7] 河野克己, 高木敏行, 千種直樹, 「ニッケル基合金機器の検査に関するプログラム(PINC)」の概況, 保全学, Vol. 6, No. 1, pp. 67-69 (2007)