

研究種目：若手研究（スタートアップ）  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20860034  
 研究課題名（和文）高空間分解能フェイズドアレイ探触子と欠陥の詳細形状可視化手法の開発  
 研究課題名（英文）Development of Ultrasonic High Spatial Phased Array Probe and Detailed Flaw Shape Visualization Technique

研究代表者  
 黒川 悠 (KUROKAWA YU)  
 東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
 研究者番号：40513461

## 研究成果の概要（和文）：

はじめにフェイズドアレイ探触子の空間分解能を音場解析で算出する手法を提案した。また、これを用いて高い空間分解能を有するフェイズドアレイ探触子の設計を行った。次に、設計したフェイズドアレイ探触子について、差分法による超音波伝播のシミュレーションを行って、有効性を明らかにした。この過程で、可視化結果に現れるノイズを除去し、欠陥を明瞭に可視化する手法を提案した。最後に実験を行い、有効性を確認した。

## 研究成果の概要（英文）：

Firstly, the high spatial resolution phased array transducer was designed by utilizing acoustic field analysis. Next, the effectiveness of the designed probe was investigated by numerical simulation. There were many noises in the visualized result, hence noise reduction method was newly proposed. Finally, the effectiveness of the designed probe was also investigated by experiment.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,330,000	399,000	1,729,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,530,000	759,000	3,289,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：非破壊検査、超音波探傷試験、フェイズドアレイ、疲労き裂、応力腐食割れ、可視化

## 1. 研究開始当初の背景

昨今、原子力発電設備において疲労き裂や応力腐食割れ（SCC）が発生して問題となっている。これまで日本の原子力発電設備では、このような欠陥が検出された場合には構造

健全性の良否にかかわらず設計・製造規格に基づいて修理することが必要であった。しかしながら、機器の構造健全性に全く影響を与えない欠陥を修理することは必ずしも得策とは言えない。このような観点から、共用期

間中の原子力発電設備についての非破壊検査と欠陥評価の方法を規定した日本機械学会の維持規格が2003年10月に改正された電気事業法によって適用されることとなった。維持規格では、検査において欠陥が検出された場合には、構造健全性評価を行って機器の余寿命や継続運転の可否を判定する。

ところで、欠陥の進展速度は疲労き裂とSCCで異なるため、維持規格による構造健全性評価のプロセスも、検出された欠陥種別によって異なっている。そのため機器の余寿命を正しく判定するためには、欠陥種別を判定すること、すなわち損傷が疲労き裂であるかSCCであるかを判定することが重要である。この欠陥種別の判定について、現状では原子力発電設備の運転条件と発生場所、および過去の事例等の情報を鑑みて行っているが、原子力発電設備では同一部位に疲労き裂とSCCが生じる場合があるため、非破壊検査で実際に損傷種別を判定できる手法の開発が望まれている。しかしながら、現在のところ損傷種別を確実に判定できる手法は確立されていない。

## 2. 研究の目的

特に原子力発電設備に生じた欠陥について、その欠陥が応力腐食割れ（SCC）であるか疲労き裂であるかを非破壊的に判定できる手法の開発を目的として研究を行った。

## 3. 研究の方法

原子力発電設備の溶接部に生じるSCCは主に金属結晶の粒界に沿って進展するため屈曲した形状になるという特徴がある。一方で疲労き裂は屈曲せずに進展するため、この形状の差異を超音波探傷試験で可視化することで欠陥種別の判定を行うことを試みた。また、欠陥を可視化できる手法として、近年フェイズドアレイ法と呼ばれる手法が注目されている。しかしながら現在主流のフェイズドアレイ探触子では、おおまかな欠陥の形状を把握できるだけで、欠陥種別を判定できるだけの空間分解能は有していない。

そこで本研究では、欠陥の詳細な形状を明瞭に可視化できる空間分解能を有するフェイズドアレイ探触子と、それを用いて欠陥の詳細形状を可視化する手法の開発を行った。具体的には、

- (1) 音場解析手法を用いてフェイズドアレイ探触子の空間分解能を計算する手法を開発し、その手法を用いて高い空間分解能を有するフェイズドアレイ探触子を開発する。
- (2) 設計したフェイズドアレイ探触子について、差分法による超音波伝播の数値シミュレーションを行い、シミュレーションモデル中に導入した欠陥を可視化する。

また、欠陥を明瞭に可視化する手法について検討する。

- (3) 実際に実験を行い、試験片に導入した欠陥の可視化を試みる。  
の手順で研究を行った。

## 4. 研究成果

はじめに、フェイズドアレイ探触子の空間分解能を音場解析で算出する手法を開発した。可視化画像の空間分解能は超音波ビームを収束させたときの幅に依存するため、超音波の音場を解析するプログラムを独自に開発した。また、これを用いてフェイズドアレイ探触子を構成するための各種パラメータを変化させながら空間分解能を調査し、高い空間分解能を有するフェイズドアレイ探触子の設計を行った。その結果、フェイズドアレイ探触子の空間分解能は、超音波の周波数が一定のときは、探触子の全体の長さ、すなわち開口幅に強く影響を受け、各超音波振動子の大きさや間隔はあまり影響しないことが明らかになった。また、厚さ40mm程度の部材で超音波探傷試験を行って欠陥を可視化する場合には、開口幅が91mm程度あれば、探傷を行う領域全体で分解能が2mm程度以上となり、欠陥を明瞭に可視化できる可能性があることが分かった。

また、音場解析結果と実験値がどの程度一致するかの調査を行った。上述した音場解析手法では、超音波源は点音源の集合であると仮定して計算を行っている。しかしながら実際には超音波自体が持つ指向性の影響があるため、計算値と実験値は異なる可能性がある。そこで音場解析結果と実際の超音波の音場を比較するために実験を行った。その結果、超音波振動子単体では音場解析結果と実験結果に差異が見られたが、振動子が集合してフェイズドアレイ探触子を構成した場合には、総合的な音場は解析結果と実験値でほとんど差異が無いことが明らかになった。

次に、設計したフェイズドアレイ探触子について、差分法による超音波伝播のシミュレーションを行って、有効性を明らかにした。図1に、疲労き裂を模擬したスリット状欠陥を導入したシミュレーションモデルを示す。このモデルに設計したフェイズドアレイ探触子（振動子数19個、開口幅91mm、中心位置が欠陥の位置と一致）を導入し、フェイズドアレイ探触子を構成する各超音波振動子で仮想的に超音波を送受信して、受信した信号を元に可視化画像を構築した。なお、可視化に用いる手法には、簡便かつ欠陥を高い空間分解能で可視化できる、開口合成法を用いた。

図2に、開口合成法を用いて欠陥を可視化した結果を示す。図2に示した結果からは、欠陥の位置や形状を読み取ることはできな

い。これは、超音波振動子から試験体内に縦波超音波が入射したり欠陥で反射したりする際に、速度が異なる横波やレイリー波にモード変換し、それらがノイズとして受信信号中に現れるためであることが明らかになった。これらのノイズは現在主流のフェイズドアレイ探触子を用いた探傷では問題になることは少ないが、今回用いた探触子は開口幅が大きく、探傷する領域が相対的に探触子近傍に近づくために影響が強く現れることが明らかになった。

ところで、これらのノイズの中で、試験体表面を伝播する縦波超音波（ラテラル波）、底面でのエコーおよび試験体表面を伝播するレイリー波は、送信振動子と受信振動子の位置と各波の速度が既知であれば、欠陥の位置に関わらず到達時刻を見積もることができる。そこでこれらのノイズを受信信号中から消去して、再度欠陥画像の可視化を行った結果を図3に示す。図3では試験体の中央部から離れた部分で依然として依然として円弧状のノイズが現れているが、モデル中の人工欠陥先端の部分に鋭くかつ強い強度を持つ点が観察できた。

次に、SCCを模擬した屈曲した欠陥を導入したモデルを用いて同様のシミュレーションを行い、可視化を行った。モデル中に導入した欠陥の形状と、可視化結果を併せて図4に示す。図4の結果から、シミュレーションモデルに導入した欠陥の形状を明瞭に可視化出来ていることが分かる。また、図3の可視化結果との差異を観察することで、欠陥の種別判定を行える可能性があることを示した。

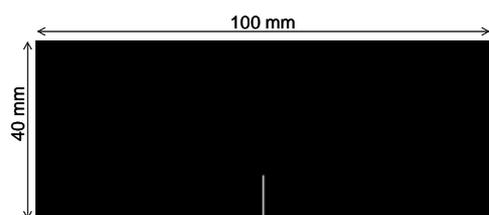


図1 シミュレーションモデル

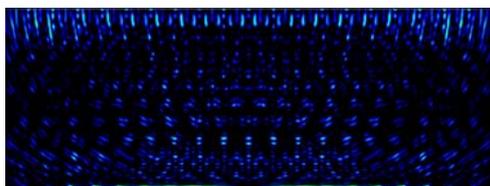


図2 開口合成法による欠陥可視化結果

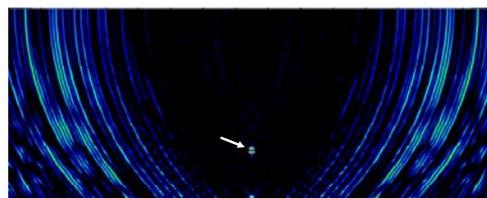


図3 ノイズ除去後の可視化結果

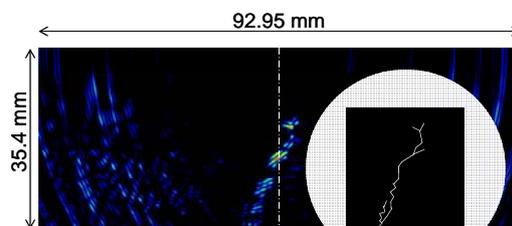


図4 SCC 模擬欠陥の可視化結果

次に、実験を行って有効性を確認した。はじめにスリット状の人工欠陥1個を有するSUS304製の試験片について、設計したフェイズドアレイ探触子を重ね合わせの原理を用いて再現し、超音波探傷を行って可視化画像を得た。試験片の形状は図1に示した、シミュレーションモデルと同一である。但し実験ではシミュレーションと比較して様々なノイズが現れることが予想されたため、開口幅を100mm、振動子数は78個と、シミュレーションを行った条件よりも大きな値を設定した。

図5にノイズ除去を行わずに可視化を行った結果を示す。シミュレーションで得た結果（図2）と比較して、ノイズは少なく、矢印で示した位置にスリット先端を確認できる。しかしながら依然として全体にわたってノイズが現れており、特に表面近傍や底面ではノイズ強度が強いことが観察できる。

一方、提案したノイズ除去手法を適用して可視化を行った結果を図6に示す。但し、実験では受信波形中でレイリー波より後方に正体不明のノイズが強く現れたため、レイリー波以降の波を全て除去して可視化を行った。可視化結果については、図5と比較してノイズが減少し、人工欠陥先端部でのみ強度の強いエコーが確認できる。しかしながら画像の分解能自体は図5の結果として低下しているため、実際に欠陥の探傷や種別判定を行う場合には、ノイズ除去前と除去後の可視化結果を比較することが重要であると言える。

最後に、間隔がそれぞれ1.0mm、2.0mm、4.0mmの隣接したスリット状の人工欠陥を有するSUS304製の試験片を用意し、それぞれについて提案手法で実験を行い、欠陥の可視化画像を得た。その結果、間隔が1.0mmのものとは2.0mmのものでは先端を明瞭に分離して観察出来なかったが、欠陥先端が

4.0mm 程度離れていれば、可視化画像でそれぞれの先端を分離して観察することが可能であることが明らかになった。

本研究では実際の SCC については実験で検証を行っていないが、隣接欠陥に対する可視化結果から、実際の SCC についてもある程度の屈曲であれば捉えられる可能性があると言える。

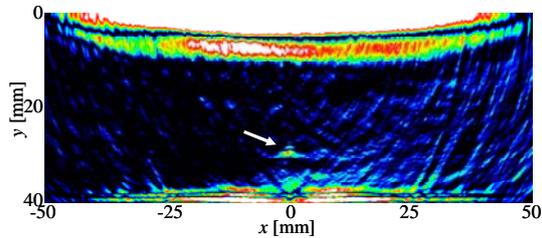


図5 実験による欠陥可視化結果

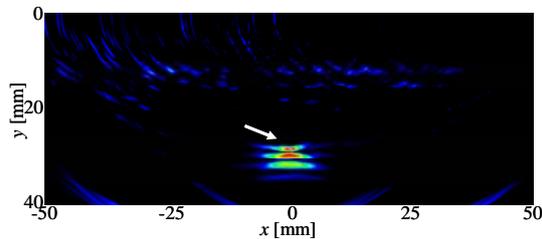


図6 ノイズ除去を併用した可視化結果

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① 黒川悠、今泉優幸、井上裕嗣、フェイズドアレイ探傷画像の分解能向上に関する基礎的研究、日本機械学会論文集A編、第76巻、398、400、2010年、査読有

[学会発表] (計5件)

① Yu Kurokawa, Development of flaw visualization technique at near field of phased array probe, The 2010 M&M International Symposium for Young Researchers, 2010年3月3日、カリフォルニア工科大学 (カリフォルニア州)

② Masayuki Imaizumi, Yu Kurokawa, Hirotugu Inoue, Fundamental study on spatial resolution enhancement of phased array image, The 13th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing, 2009年11月10日、パシフィコ横浜 (横浜市)

③ 黒川悠、今泉優幸、井上裕嗣、フェイズドアレイ探傷画像の分解能向上に関する基礎的研究、M&M 材料力学カンファレンス 2009、2009年7月26日、札幌コンベンションセンター (札幌市)

④ Yu Kurokawa, Yoshihiro Mizutani, Hirotugu Inoue, Masami Mayuzumi, Designing of the High Spatial Resolution Phased Array Transducer for Crack Type Distinction, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008年10月25日、上海 (中国)

⑤ 黒川悠、水谷義弘、井上裕嗣、ウェーブレット変調パルス圧縮を用いた超音波探傷試験に適したマザーウェーブレットの検討、M&M 材料力学カンファレンス 2008、2008年9月17日、立命館大学 (滋賀県)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

黒川 悠 (KUROKAWA YU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：40513461

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし