The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	点焦点型電磁超音波センサによるステンレス鋼溶接部の探傷に関する研究
Author(s)	芦田, 一弘
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/69236
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

点焦点型電磁超音波センサによる
ステンレス鋼溶接部の探傷に関する研究

平成 29 年 10 月

芦田　一弘

点焦点型電磁超音波センサによる
ステンレス鋼溶接部の探傷に関する研究

博士（工学）論文提出先
大阪大学大学院基礎工学研究科

平成 29 年 10 月

芦田　一弘

Abstract

I developed point focusing electromagnetic acoustic transducer (PF-EMAT) for detection of stress corrosion cracking (SCC) located on inner surface of stainless steel pipes in nuclear power plants. Being based on the Lorentz force mechanism, this EMAT generates shear-vertical (SV) waves from concentric line sources on the top surface of a stainless steel plate, and the SV waves are focused on the focal point on the bottom surface in phase. The focusing effect improved the spatial resolution and detectability of defects located on the bottom surface. More importantly, EMAT generates and receives waves through the Lorentz force mechanism, and it needs no couplant, leading to higher reproducibility than conventional piezoelectric transducers.

I evaluated dynamic range and spatial resolution for slit detection of PF-EMAT operated at different driving frequencies. Artificial slits, as shallow as 0.05 mm deep located on the bottom surface of stainless steel plates of 20 mm thickness, was well detectable at 2.0 MHz, and amplitude profiles around slits showed the slit shapes clearly. It was also observed that the echo amplitude of SV wave shows oscillatory pattern of nearly equal period as a function of the slit depth. In addition, the effect of the in-plane incident angle of the SV waves to the slit face, reproducibility of the measurements, and the liftoff effect were evaluated.

As a next step for application, I detected artificially introduced SCCs located close to welded area of stainless steel pipe, and found that crack of 0.5 mm depth was well detectable at the frequency of 2.0 MHz; the defect detectability is comparable to phased array piezoelectric transducer, being promising for the field applications.

I finally calculated the two-dimensional acoustic field using two-dimensional finite element method (FEM) to understand why the echo amplitude of SV wave oscillates with slit depth. The FEM calculation reproduces the oscillatory amplitude behavior for the same condition as the experiment. Calculated resonant frequencies with various slit defects revealed that there are particular resonant frequencies in the band centered at the excitation frequency (2.0 MHz). At these frequencies, vibrational energy is highly concentrated to the region around the slits and a set of distinct nodes and antinodes occurs in the slit faces, being attributable to Rayleigh wave resonance there. It is then concluded that the acoustic energy of the incident SV wave is focused at the slit mouth and a part of the energy is spent to excite this local vibration, making the echo amplitude decrease.

目　次

第 1 章 緒言 1
1.1 研究背景 1
1.2 技術的背景 1
1.3 研究目的 4
1.4 本論文の構成 5
第 2 章 点焦点型電磁超音波センサの設計・開発 6
2.1 圧電型探触子を用いた UT での検出原理 6
2.2 電磁超音波センサでの送受信原理 7
2.3 ステンレス鋼材に係わる確認 10
2.3.1 浸透深さの影響 10
2.3.2 超音波の減衰と伝搬の影響 11
2.4 点焦点型電磁超音波センサの新たな設計・開発方法 12
第 3 章 人工スリットを使った PF-EMAT の検出性能の評価 14
3.1 超音波送受信システム及び試験片 14
3.2 ステンレス鋼材でのスリット検出性能に係わる実験内容と結果 15
3.2.1 コイルの巻き数が受信振幅に与える影響 15
3.2.2 駆動周波数によるスリット検出性能の変化 16
3.2.3 圧電型探触子を用いた UT でのスリット検出実験 18
3.2.4 スリット周辺の空間分解能の評価 20
3.3 溶接試験片でのスリット検出性能の評価 21
3.4 探傷現場で測定の再現性を低下させる要因の評価 23
3.5 人工スリットの検出性能に対するまとめ 25
第 4 章 SCC の検出性能の評価 26
4.1 平板状 SCC 試験片での検出実験結果 26
4.1.1 試験片の概要 26
4.1.2 PF-EMAT を用いた SCC の検出 28
4.2 配管状試験片の SCC の検出実験結果 31
4.2.1 圧電型探触子を用いた UT での SCC の検出 32
4.2.2 フェイズドアレイを用いた UT での SCC 深さ測定 33
4.2.3 PF-EMAT を用いた SCC の検出 34
4.2.4 切断確認による SCC 深さの評価 35
4.3 SCC の検出性能に対するまとめ 38
第 5 章 有限要素法によるスリット周辺の音場解析 39
5.1 PF-EMAT でのスリット検出結果 39
5.2 解析モデルの妥当性評価 40
5.3 PF-EMAT による超音波の伝搬状況確認 41
5.4 スリットからの受信振幅値の計算結果 42
5.5 スリット周辺の局所振動の解析 44
5.6 スリット周辺の音場解析のまとめ 47
第 6 章 結言 48
謝辞 49
参考文献 50
研究業績一覧 53

第 1 章 緒言

1.1 研究背景

現在，我が国には廃止決定がされていない原子力発電所が 44 基ある．1966 年に初めて商業用原子力発電所が運転を開始してから約 50 年が経過し [1]，稼働している原子力発電所の多くが 30 年以上またはそれに近い営業年数を経過している．現在も政府のエネルギー基本計画において，原子力はベースロード電源として位置づけられていることから，今後も原子力発電所を継続的にかつ安定的に利用する必要がある．特に老朽化した原子力発電所に対しての点検・補修等の「高経年化対策」の充実が，今後とも安全にかつ安定的に運転するための最重要課題といっても過言ではない．

高経年化対策の中では，圧力容器や配管の主要構成材料であるステンレス鋼材の溶接部に発生する応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking，以下，SCC とする）の検出は重要な課題である．ステンレス鋼材は Fe を主成分とし Cr を添加した合金鋼であり，Cr が表面に強固な酸化皮膜を形成するため，腐食が発生しにくい．このことから，ステンレス鋼材は腐食に対して高い耐性が要求される原子力発電所や化学・石油プラントの構成材料に広く用いられている．しかし，ステンレス鋼材は溶接施工の際に高温環境に曝されると，溶接部近傍の Cr 濃度が大きく低下し腐食に対して鋭敏化する [2),3)]．また，溶接施工に伴い発生する残留応力にも影響を受け，さらに内部流体の水分中の溶存酸素に影響を受ける．このように，材料・残留応力・腐食環境の 3 要因が重複すると，結晶粒界に沿って内部に進展する割れが発生する [2),3)]．このような割れを SCC と呼ぶ．SCC は進展性を有しているため，最悪の場合，圧力容器や配管等が破損し内包物質の漏洩につながる．よって，SCC は最も有害な欠陥である．

SCC は配管等の内面の溶接部と母材部の境界に発生するため，溶接部を切断しなければ目視等での直接確認を行うことができない．SCC の検出には非破壊試験の一種である圧電型探触子による超音波探傷試験（Ultrasonic Testing 以下，UT とする）が用いられている [4)]．これは主に SCC からの反射波の振幅の大きさ（以下，エコー高さとする）を基に，SCC の有無や深さを評価するものである．実際の探傷では，日本機械学会が制定した「発電用原子力設備規格　維持規格 [5)]」に基づいてエコー高さを確認し，その変化から SCC の発生や進展を経年的に確認している [4),6)]．

しかし，現状の圧電型探触子を用いた UT では，エコー高さの情報だけから SCC の発生および進展を画一的に評価することは困難である．特に内面の溶接部近傍では，健全部であっても裏波と呼ばれる溶接金属が突出した形状が存在し，その部分からのエコーが観測される．そのため，設備の使用開始前に裏波からのエコー高さを記録しておき，そのベースラインを差し引きし変化があるかどうかで，SCC の発生および進展を経年的に監視する．しかし，この方法では探傷面上に超音波の発信源である圧電型探触子を直接接触させて試験員が手動で走査するため，表面状態や探触子と探傷面の間に塗布する接触媒質の量によって試験結果が左右されやすい．さらに，試験員の技量の程度による差異も発生しやすい．このような理由により従来の圧電型探触子を用いた UT では，再現性の高い試験が困難な場合が多く，探傷現場で広く活用されているにもかかわらず，必ずしも検出性に優れた試験方法とはいえないのが現状である．

1.2 技術的背景

一般的な配管・圧力容器に適用される非破壊試験方法 [7)]の概略を Fig. 1.1 に示す．非破壊試験方法には色々な方法があるが，内面に発生する SCC のような欠陥の検出には，UT 以外にも放射線を利用した方法（Radiographic Testing，以下 RT とする），渦電流を利用した方法（Eddy Current Testing，以下 ECT とする）が使われる．

RT とは，放射線を試験体に照射・透過させ，試験体の背面に設置したフィルムの黒化現象の度合いから欠陥の有無を確認する方法である [6),8)]．この方法では健全部と欠陥での放射線の透過率の違いを利用するため，体積の小さい割れなどの欠陥は明確に検出することができない．よって，RT は溶接施工時に発生するブローホールや溶け込み不良等の比較的体積が大きい欠陥の検出に用いられる．

ECT とは，電磁誘導現象を用いて材料表面近傍に渦電流を発生させ，欠陥が存在すると材料表面近傍のインピーダンスが変化することを利用して欠陥を検出する方法である [6),8)]．表皮効果により材料表面近傍にしか渦電流が発生しないため，厚板材料では表面から裏面の欠陥を検出することはできない．よって，厚さが非常に薄い熱交換器の伝熱管や表面および表層部の探傷に限定して用いられている．

これらの手法に対して，超音波は空気と試験体の界面のように音響インピーダンスの差が大きい境界では強く反射するため，体積が小さい割れであってもエコーが観察される．また，超音波は試験体中を伝搬して内面まで到達することができるため，表面から内面の欠陥を検出することができる．よって，原子力発電所をはじめとした各インフラ設備での SCC の検出には UT が多用されている．

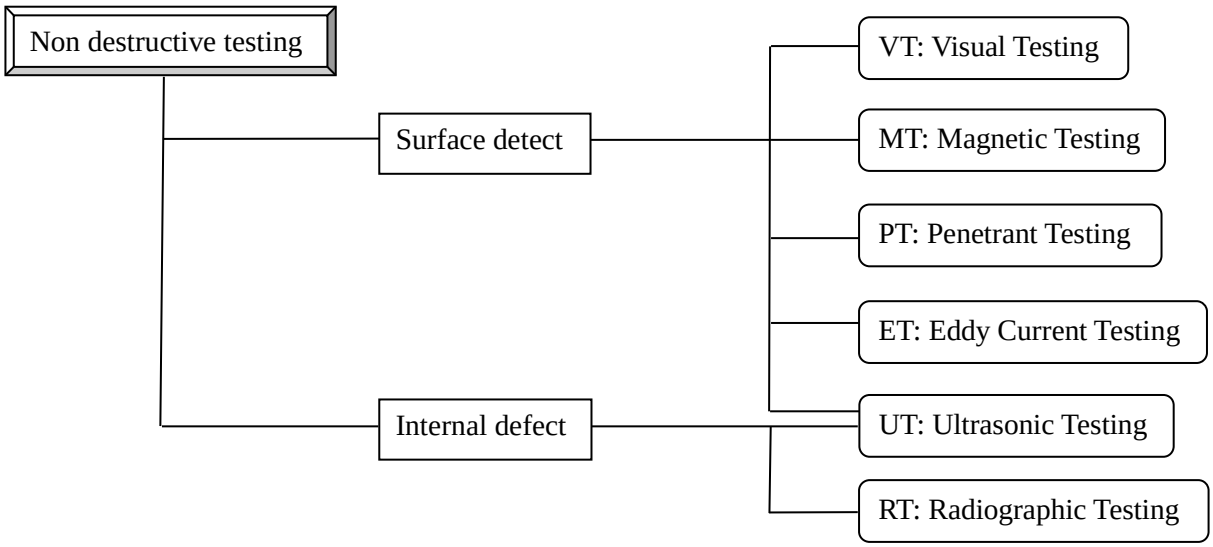


Fig. 1.1 List of nondestructive testing methods for pipes and vessels.

しかし，圧電型探触子を用いた UT では，探傷面上に探触子を接触させる方法であるため，前述したように試験結果が表面状態（グラインダー加工や腐食による凸凹等），接触媒質量，押し付け強さ等の要因に影響を受けやすく，かつ，試験員の技量等による差異が発生しやすい．このような要因により，探傷現場では再現性の高いエコー高さデータを採取できない場合が多い．

接触媒質量が試験結果に影響を与える一例として，接触媒質であるグリセリンを 0.01 ml から 0.30 ml まで変化させた時の圧電型探触子（周波数 2.0 MHz，公称屈折角 45°）でのスリットからのエコー高さの測定例 [9)]を Fig. 1.2 に示す. 試験片は厚さ 12.7 mm のステンレス鋼材で深さ 1.0 mm のスリットが裏面に加工されている．Fig. 1.2(a)に実験状況を，Fig. 1.2(b)にエコー高さと接触媒質量の関係を示す．接触媒質量が 0.10 ml 以上ではエコー高さはほぼ一定であるが，0.10 ml 以下になると接触媒質量の減少とともにエコー高さが小さくなる．実際には圧電型探触子を手動または自動で走査するため，接触媒質量が変化することがある. これがエコー高さを測定した時の再現性低下の主な要因となっている．

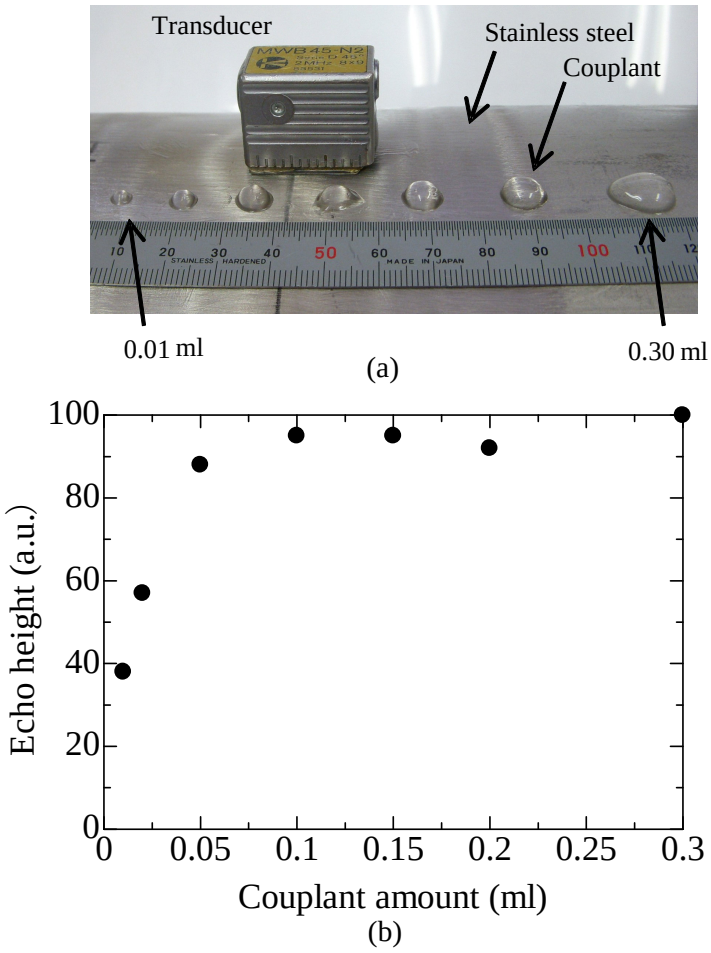


Fig. 1.2 (a) Piezoelectric transducer, specimen, and couplant. (b) Echo heights measured with different amounts of couplant at 2.0 MHz [9].

原子力発電所では，建設時からエコー高さを経年監視しているが，エコー高さの再現性が乏しいことが指摘されてきた．これは，現状の圧電型探触子を用いた UT 全体の問題点を的確に表現している．探傷現場で生じている例を以下に示す．

① 溶接施工後の SCC がない健全な状態で UT を実施し，裏波からのエコー高さを記録．

② 探傷現場での実際例として，使用開始 10 年後に同一方法で試験員が変わって UT を実施．同一位置で 2 倍のエコー高さを記録．

③ ②で得られた変化程度では，新たに SCC が発生したかの判断は現状では困難．

以上のように，探傷現場では経験的にエコー高さには 0.5 倍から 2 倍（± 6.0 dB）程度のばらつきがあるとの考え方が支配的であり，再現性の問題が常に生じている．

この問題点を解決するために非接触での超音波探傷法として，レーザー超音波 [10]，空気伝搬超音波 [11]，電磁超音波 [12)-15)]等の手法が研究されている．これらの中で，本研究では電磁超音波センサ（Electromagnetic acoustic transducer: EMAT）に注目する．EMAT はローレンツ力や磁歪力を用いて音源を直接試料内に発生させるため音響結合材が不要であり，その結果センサと試料の接触状態の影響を受けにくい．また，試料の表面粗さや被膜の有無などの表面状態にも影響を受けにくい．レーザー超音波のような光学系の精密な管理・調整が不要であり，空気伝搬超音波のように現場の大気温度や湿度，空気の対流の影響を受けることがないことも利点である．ここで，永久磁石と蛇行コイルからなる一般的な EMAT[16]の概略図を Fig. 1.3 に示す．EMAT では，横波，縦波，レイリー波等の様々な音波を励起することができる．

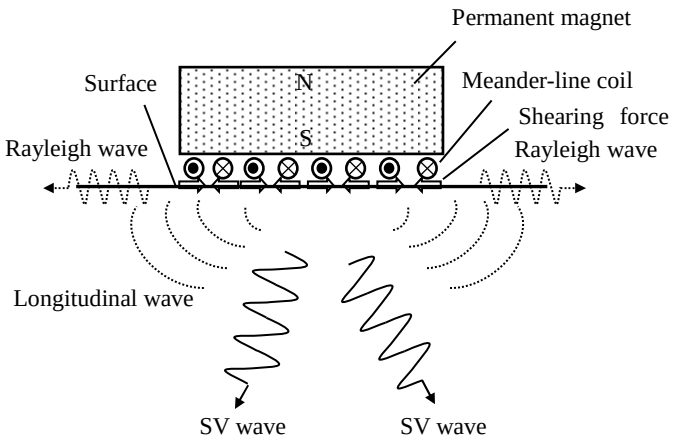


Fig. 1.3 An EMAT with a permanent magnet and a meander-line coil.

一方で，圧電型探触子に比べると送受信効率が低いという欠点がある．特にステンレス鋼材のように電気抵抗が大きい材料 [17]では，発生する渦電流の浸透深さ [18]が大きいため，励起する超音波の波長が短くなると（高周波になると）送信効率が低下する．かつ，比較的大きい結晶粒による散乱損失とジュール損失も大きく，これらも送受信効率を低下させる．ここで，EMAT と圧電型探触子を比較すると，次のような整理ができる．

① 圧電型探触子と試験体の境界に隙間（空気層）が存在すると，音響インピーダンスの差によって超音波が著しく透過しにくくなる．この問題を解決するために，圧電型探触子では液体の接触媒質を探触子と試験体の間に塗布する必要がある．このとき接触媒質の量や圧電型探触子の押し付け強さのばらつきによって結果もばらつく．

② EMAT は試験体表面に非接触でローレンツ力や磁歪力を発生させ，材料中に直接超音波を直接入射させ受信することができる．非接触で材料中に超音波を入射可能であるため，接触媒質が不要である．よって，接触媒質の量や押し付け強さに起因する測定誤差が生じない．

③ 一般に EMAT は圧電型探触子と比較すると SN 比（信号とノイズの比）が低い [19),20)]．このため，入力電圧の増幅やそれに伴うノイズ対策が必要となる．

1.3 研究目的

EMAT は，80 年程前から研究が行われている [20)]．例えば，1930 年代には黄銅円柱内での低周波における内部摩擦の研究に電磁気的な作用が用いられている [21)]．金属内に超音波を励起させる条件，それに関する理論の確立といった基礎研究や，鉄道レールやシームレスパイプに対する自動検査装置開発，高い温度環境での測定といった実用的な研究も行われてきた．また，SN 比の改善のために，共鳴を利用した測定法に関する研究も行われており，EMAT は他の非接触超音波技術であるレーザー超音波や空中超音波と比較すると，成熟した技術であるといえる．近年では，線集束型 EMAT やアレイコイル EMAT も開発され，金属材料中において超音波の音圧を高めることが可能となってきた．

しかし，原子力発電所を始めとする各産業界への普及は残念ながら非常に少ないのが現状である．普及しなかった一因は，送受信効率の低さと，経年監視を指示する国（原子力規制機関）および探傷現場サイドでの従来方法への固執である．また，ステンレス鋼材においては，超音波の減衰が著しいことも障害となっていた [19),22)-24)]．

本研究では，SCC を高感度かつ高精度での検出を可能にする新たな EMAT を研究する．日本機械学会が発行している発電用原子力設備規格 維持規格 [5)]において，圧電型探触子を用いた UT では 1.5

mm 以上[5]（厚さが 5mm～37.5mm の場合）の欠陥（SCC）であれば，検出率が 100 %とされている．そこで，ステンレス鋼材において 1.5 mm 以下の欠陥（SCC）を検出することができる電磁超音波センサの開発を目的とする．

1.4 本論文の構成

第 2 章にて圧電型探触子と EMAT の特徴について比較し, EMAT は表面状態の影響を受けない SCC の検出における有効なセンサであることを確認する．その上で過去の研究成果や知見をベースに，ステンレス鋼材でのスリットの検出が可能となるような，材料内の一点に SV（Shear Vertical）波を集束させる新しい点焦点型 EMAT の設計・開発を行う．

第 3 章では開発した点焦点型 EMAT を用いて，ステンレス鋼材や溶接部近傍に導入したスリットの検出性能を評価する．また，探傷現場において測定の再現性を低下させる要因を検討し，予想される影響に係る実験を行い，探傷現場での適用性を評価する．

第 4 章では人工的に SCC を発生させた平板状試験片と溶接施工された配管状試験片に対して, SCC の検出性に係わる実験を行う．具体的には圧電型探触子を用いた UT やフェイズドアレイによる UT と検出性能を比較し，測定後に試験片を切断して点焦点型 EMAT で検出された最小 SCC 寸法を確認し，SCC の検出性能を評価する．

最後に，第 5 章では開発した点焦点型 EMAT から発生する超音波の指向性や，スリットからの反射挙動について有限要素法（Finite Element Method，以下 FEM とする）を用いて解析し，実験結果の確認を行う．特に，スリット深さに対して受信振幅が振動する挙動の要因を明らかにする．

第 2 章 点焦点型電磁超音波センサの設計・開発

本章では，EMAT の開発に際して，検出原理や適用方法について圧電型探触子を用いた UT と比較検討する．ステンレス鋼材に対しての電磁気的特徴である浸透深さの影響や，超音波の伝搬および減衰の特徴を示す．これらの内容を踏まえた上で，過去に開発された線集束型 EMAT[16),25)]の研究成果の知見を参考にし，本研究では新たに点焦点型 EMAT（Point focusing Electromagnetic acoustic transducer，以下 PF-EMAT とする）を設計・開発する．

2.1 圧電型探触子を用いた UT での検出原理

我々の聴覚に音として捉えられる音波に対して，耳で聞くことができない周波数が 20 kHz を越える音波を超音波と呼ぶ．一般に，各産業界でのプラントに対する保守検査および製造時の検査で多用される圧電型探触子を用いた UT は，1.0 MHz～10.0 MHz 程度の周波数帯域の超音波を用いている[6),8),26)]．超音波の特徴は，放射線等の電磁波と違い人体に害がなく安全性に優れ，かつ，優れた直進性を持ち各物質の境界で反射する点である．

圧電型探触子を用いた UT で利用する超音波は大きく分けて二つある．一つは変位方向が波の伝搬方向と一致する縦波で，もう一つは変位方向が波の伝搬方向に垂直な横波である．Fig. 2.1 には，縦波を垂直に入射する垂直探傷[26)]と，斜め方向に SV 波を伝搬させる斜角探傷[26)]の模式図を示す．垂直探傷は溶接部に発生する SCC の検出には，ほとんど用いない．これは，SCC は板厚方向に発生・進展するため，超音波の入射に対して反射面積が小さく，反射強度が小さくなるためである．一方，斜角探傷では斜め方向に超音波を伝搬させることから，超音波の反射面積が大きくなる．また，SCC から距離を置いた位置から超音波を入射できるので，溶接部の余盛の影響も受けない．そのため，斜角探傷が SCC の検出に用いられることが多い．

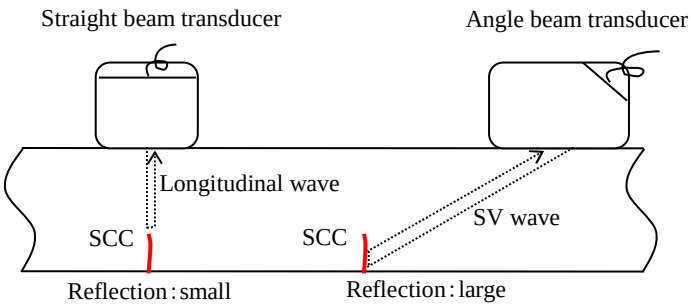


Fig. 2.1 Straight beam testing and angle beam testing.

Fig. 2.2 は，斜角探傷で用いられる斜角探触子の模式図である．超音波探傷器から方形の圧電振動子に電圧信号を与えると，圧電効果によって振動し縦波超音波が発生する．この縦波はアクリル樹脂のクサビ内を伝搬し，液体の接触媒質を介して材料境界面で SV 波に変換され，材料中を斜め方向に屈折角度 θ で伝搬していく．また，この逆過程を経て欠陥などからの反射信号が受信される．

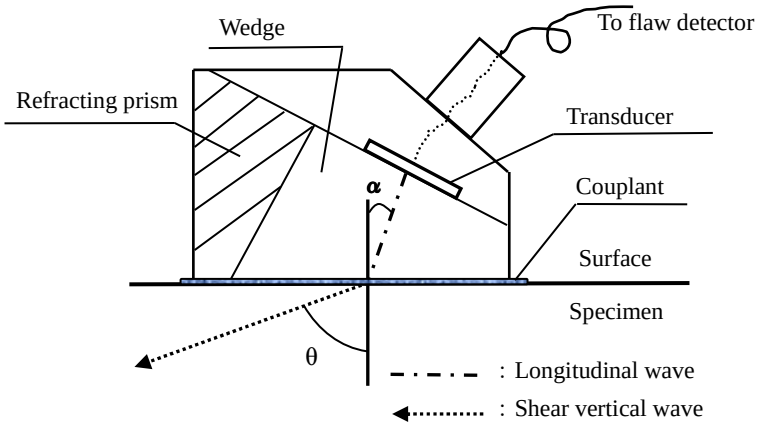


Fig. 2.2 Angle beam transducer.

実際に行われる圧電型探触子を用いた UT の概略を Fig. 2.3 に示す．一般に UT での入力電圧信号はパルス状である．使用されるパルスの中心周波数は 1.0～10.0 MHz であり [26]，ステンレス鋼材では 2.0 MHz [4] が多用され，屈折角度 θ は板厚方向に発生する面状の欠陥（SCC 等）の反射効率が良好な 45°が多用されている [4]． この斜角探触子を試験員が手動で走査し，SCC から反射されるエコー高さを探傷器上の画面で確認し，SCC か否かの判断やその大きさの推定を行っている．なお，本論文中の圧電型探触子とは，断りがない限りこの斜角探触子を指す．

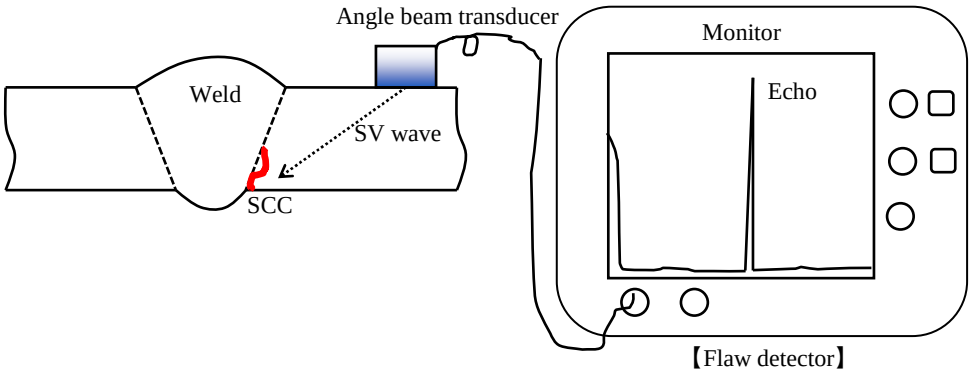


Fig. 2.3 Schematic of UT system.

2.2 電磁超音波センサでの送受信原理

EMAT は，静磁場中においた金属材料の表面に交流の渦電流を励起し，磁場と電流の作用によって発生するローレンツ力を音源とする超音波センサである．強磁性体では，磁歪効果も超音波の発生と受信に関与するが，本研究の対象が非磁性のステンレス鋼材であるため無視する．

探傷面に配置した導線に高電圧の交流信号を与えると，近接した金属表面に渦電流が発生し，導線上に設置した永久磁石が作り出す静磁場との相互作用によってローレンツ力が材料表面に平行に発生する．これが音源となり，Fig. 2.4(a)に示したように材料中には横波（SV 波）や縦波，レイリー波が励起される．Fig. 2.4(b)には，ステンレス鋼材を対象とした超音波の発生状況の可視化を目的に，1 本の導線と永久磁石からなる EMAT で励起される超音波の伝搬を FEM で解析した図を示す．この図からも Fig. 2.4(a)と同じように超音波が伝搬されていること，および SV 波の強度が垂直方向を中心に大きいことがわかる．材料中で反射・散乱して EMAT 下部に到達した超音波は送信の逆過程によって受信される．

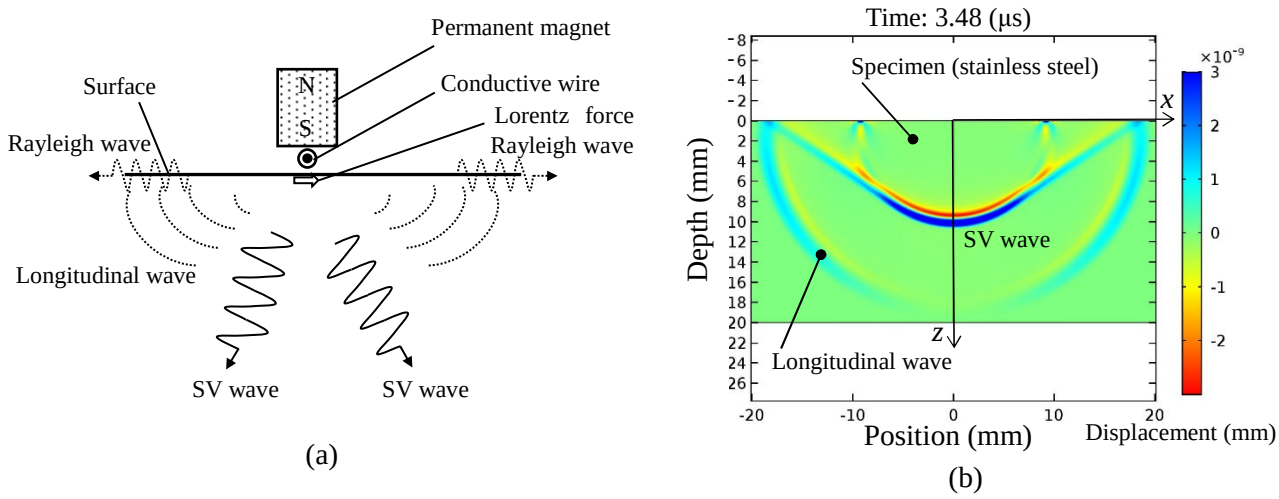


Fig. 2.4(a) Ultrasonic waves excited by an EMAT with a permanent magnet and a coil, and (b) a simulation result involving excited elastic waves. Color indicates u_x.

SV 波は，同じ周波数の縦波に比べて波長が短く（およそ半分），超音波の拡がりが小さく高い指向性を示す．反射面の分解能が良好であり，また，反射した場合における波のモードが変化する現象（モード変換）も小さいため，UT においても広く使用されている．

Fig. 2.4 に示すような導線が一つの EMAT では，コイル直下の試料表面に線音源が発生し，この線音源は表面に対して平行かつ線音源に対して垂直方向に振動する．このとき，放射される SV 波の変位成分 u_x と u_z は式（1），（2）で表される [27]．

$$u_x = \frac{1}{\pi c_{44}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sqrt{\zeta^2 - \mu^2}\sin\zeta a}{\zeta F_0(\zeta)} \left\{ \left(\mu^2 - 2\zeta^2\right) e^{-z\sqrt{\zeta^2-\mu^2}} + 2\zeta^2 e^{-z\sqrt{\zeta^2-1}} \right\} e^{i\zeta x} d\zeta \qquad (1)$$

$$u_z = \frac{i}{\pi c_{44}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin\zeta a}{F_0(\zeta)} \left\{ \left(\mu^2 - 2\zeta^2\right) e^{-z\sqrt{\zeta^2-\mu^2}} + 2\sqrt{\zeta^2-1}\sqrt{\zeta^2-\mu^2}\, e^{-z\sqrt{\zeta^2-1}} \right\} e^{i\zeta x} d\zeta \qquad (2)$$

ここで，$F_0(\zeta) = \left(2\zeta^2 - \mu^2\right)^2 - 4\zeta^2\sqrt{\zeta^2-1}\sqrt{\zeta^2-\mu^2}$ である．c_{11} は圧縮弾性定数，c_{44} はせん断弾性定数，a は音源幅の 1/2（コイル導線直径の 1/2）であり，$\mu = \sqrt{c_{11}/c_{44}}$ は縦波と横波の音速比を表す．入射角度への依存性を見るため，この結果から計算した周方向成分 $u_\theta(\theta) = u_x \cos\theta - u_z \sin\theta$ を Fig. 2.5 に示す．併せて位相の入射角度依存性も示している．a=0.05 mm とステンレス鋼材を想定して μ=1.86 とおいた．音源からの距離を r=100 mm とし，θ=0°での振幅で正規化している．Fig. 2.4(b)でその概略を見た通り，鉛直方向（θ=0°）から約 32°の角度範囲に強い振幅の同位相の SV 波が放射され，約 40°を越えるとほとんど振幅のない特徴のある指向性を持っていることが分かる．

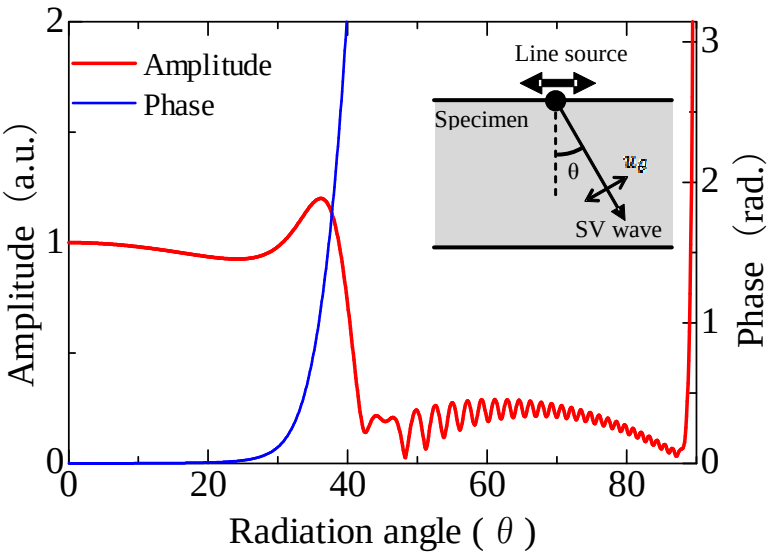


Fig. 2.5 Directivity of SV wave amplitude and phase generated by a line source calculated for stainless steel.

前述したように EMAT は送受信効率の低さが問題であった．このことを改善する目的で，超音波を材料中で線集束させることができる線集束型 EMAT（Line focusing electromagnetic acoustic transducer，以下，LF-EMAT とする）が開発されている [16), 25)]．この LF-EMAT の概略を Fig. 2.6 に示す．LF-EMAT では，蛇行コイルの直下に音源が形成され，超音波は複数の線音源から同時に材料中に放射される．複数の音源から送信される超音波が，材料中の焦点に同位相で到達するよう蛇行コイルを設計する．焦点において超音波を集束させ，高い空間分解能と確度の高い探傷に必要な信号強度を実現できることが分かっている [16),25)]．具体的には，隣接するコイルに流れる電流の方向が互いに逆であることを考慮に入れ，線音源から焦点までの距離が隣接するコイル同士で半波長ずつずれるようにコイルの間隔を設定すると，焦点においてすべての超音波が同位相になる．コイルの間隔は，横波の音速 C（m/s）と周波数 f（1/s）を用いて式（3）から決定される [16), 25)]．

$$r_i - r_{i+1} = \frac{C}{2f} \qquad (3)$$

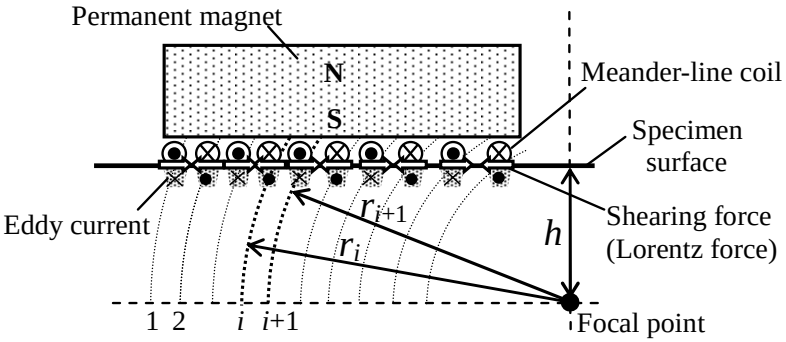


Fig. 2.6 Schematic of designing the SV-wave focusing EMAT[16)].

LF-EMAT および本研究で開発する PF-EMAT では，式（3）に従ってコイル間隔を変化させることにより，送信の際には焦点位置に SV 波のみを選別し同位相で重畳させて焦点での音圧を高めることができる [16),25)]．一方，受信の際に焦点から散乱した SV 波は，隣接する音源の直下で位相が反転するために設定した周波数で受信信号が強くなる．SV 波以外の波については，送信時に焦点で位相が揃わないため，有意な信号とはならない．

2.3 ステンレス鋼材に係わる確認

2.3.1 浸透深さの影響

PF-EMAT の設計・開発に際して，過去に開発された LF-EMAT を用いてスリット検出の予備実験を行った．その結果，アルミニウム合金のスリット（深さ d=0.5 mm）の検出が可能であることが分かったが，ステンレス鋼材（SUS304 鋼）では反射面が大きい角部（コーナー部）からの反射信号ですら確認できなかった．これは，ステンレス鋼材では超音波の減衰が大きく，かつ，表皮効果（交流電流を導電体に与えた時に，電流密度が表面から深くなると低下する）の影響 [18)]により，超音波の送受信効率が低下するためである．ここでは表皮効果に伴う浸透深さの影響について考察する．

導体内に発生する渦電流は，表面近傍で強く，導体内部に入るにしたがって指数関数的に小さくなる（～$e^{-z/\delta}$，ただし z は表面からの深さを示す）．これを表皮効果と呼び，渦電流の大きさが表面の $1/e$ となる深さ（約 37 %）を浸透深さδと呼ぶ [18)]．蛇行コイルを有する EMAT によって励起される材料中でのローレンツ力の分布は解析的に求めることができる [20)]．そこで，ここでは蛇行コイルの周期が 1.53 mm，周波数 f が 2.0 MHz の場合について，アルミニウム合金とステンレス鋼材に対して計算を行った．その結果を Fig. 2.7 に示す．

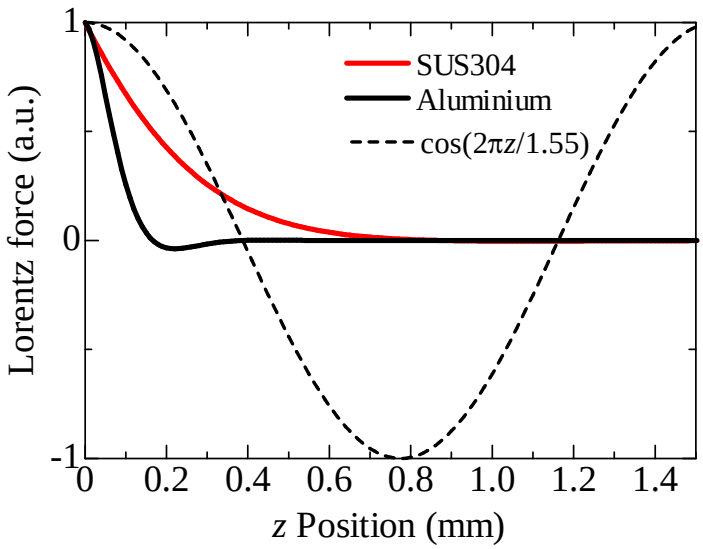


Fig. 2.7 Decrement of Lorentz force by the skin effect.

EMAT では，材料表面のローレンツ力の分布が超音波の発生に影響する．弾性波の励起には周期的な変形を発生させる必要があり，その分布が超音波の変位分布と一致するほど送受信効率が高くなる．例えば，2.0 MHz の SV 波の波長は 1.55 mm であり，波長が 1.55 mm の時の変位分布を図中に破線で示す．アルミニウム合金では波長 1.55 mm に対して音源の深さは 0.2 mm 程度であり，波長に対して十分小さい．一方，ステンレス鋼材では深さ 0.7 mm 程度に達しても表面から同じ方向にローレンツ力が作用しており，0.4 mm より深い部分において弾性波の変位方向と逆向きとなる．このため送受

信効率が低く，ステンレス鋼材でのスリットの検出は，アルミニウム合金と比較すると困難である．

さらに，ステンレス鋼材の密度はアルミニウム合金の 3 倍であるため，仮に同じ大きさのローレンツ力が働いても振幅は 1/3 となる．このこともステンレス鋼材で十分な信号強度が得られない大きな要因となっている．

2.3.2 超音波の減衰と伝搬の影響

つぎに，材料毎における超音波の減衰の影響を検討した．ステンレス鋼材はアルミニウム合金と比較すると，材料中の横波音速[26]に大きな差異（ステンレス鋼材：3100 m/s，アルミニウム合金：3080 m/s）はない．ところが，結晶粒径は圧延および熱処理状態にもよるが，ステンレス鋼材では概ね 20～100 μm 程度[28),29]であり，アルミニウム合金では概ね 30 μm 程度[30]以下である．これに加えて，ステンレス鋼材ではアルミニウムや鉄鋼に比べて結晶がもつ弾性異方性（異方性パラメータ）が大きいため，結晶粒界における超音波の散乱が大きくなる．このように，ステンレス鋼材では見かけ上の減衰が大きくなり，超音波が伝搬しにくくなる．さらに，溶接すると多大な入熱により，顕著に結晶粒が粗大化[22)-24]し，溶接部近傍において超音波の散乱減衰が大きくなる．また，溶接部においては，冷却時の急激な温度勾配の影響により材料が冶金的に大きく変化し，結晶方位の非均質性が生じる．そのため，伝搬する超音波には溶接金属内で屈曲が生じる．この影響は横波の偏向方向にも強く依存する[22)-24),31]．

以上のように，溶接部近傍では結晶の粗大化と組織の非均質性の二つの要因により，圧電型探触子を用いたUTでは欠陥の検出性が著しく低下する．しかし，Fig. 2.8に示すようにSCCは溶接部と母材部の境界部に発生するため，母材部から超音波を斜め方向に入射させ，溶接部に超音波を入射させなければSCCの検出性に悪影響を与えない．よって，本研究では斜角で入射するEMATを開発する．

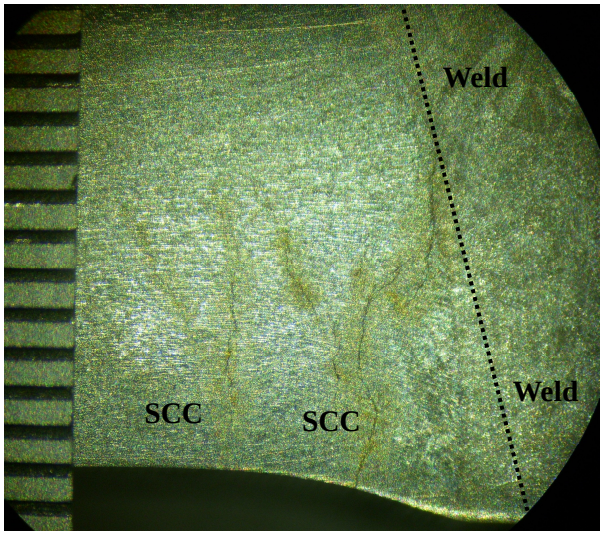


Fig. 2.8 Cross-section of welded area in stainless steel pipe. SCCs were developing near the welded area.

2.4 点焦点型電磁超音波センサの新たな設計・開発方法

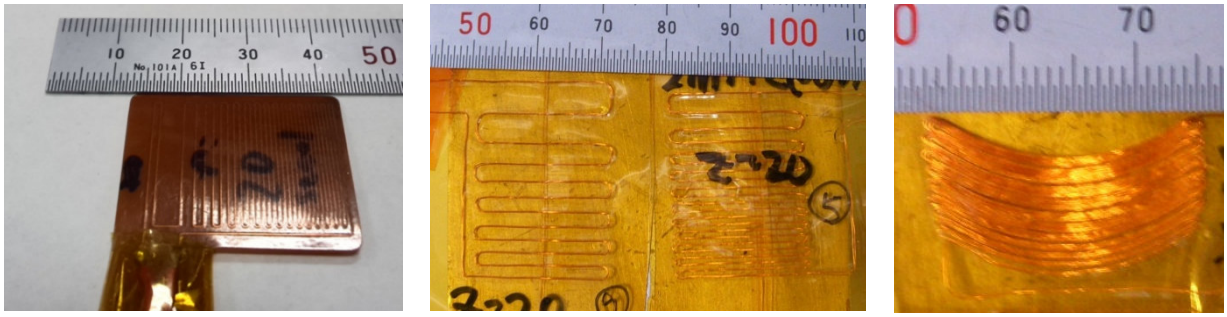
2.1 項から 2.3 項の内容を踏まえて，新たに開発した EMAT の具体的な設計指針を述べる．

① 先行研究[16),25)]では蛇行コイルを使って材料中の焦線に SV 波を集束させていた．本研究ではさらにエネルギー密度を高め，欠陥検出の空間分解能を高めるため，式（3）を用いてコイル間隔を決定し，さらにコイルを同心円弧（開き角 80°）の形状にすることにより 3 次元的に集束効率を向上させて SV 波を点集束させる．

② SV 波の指向性が強い 13°-37°に位置する音源のみを使用する．特に，入射角度 30°付近を集中的に使用できる設計を選択する．

③ 従来の LF-EMAT では 1 本の銅線を蛇行させて蛇行コイルを製作していたが，各線音源に対して最大で 1 ライン当りの最大 8 本の銅線（2.0 MHz での場合）を並べて配置するよう設計することで，各線音源からの出力を高めた．

Fig. 2.9 には開発の過程を示す．Fig. 2.9(a)には過去に作製された LF-EMAT 用の蛇行コイル，(b)には自作にて LF-EMAT を再現したコイルの試作品，(c)には集束効果を高めるために同心円弧状にした試作品，Fig. 2.10 には最終的に採用した周波数 2.0 MHz の PF-EMAT 用のコイルをそれぞれ示す．



(a) (b) (c)

Fig. 2.9 Coil arrangement for several focusing EMATs. (a) and (b) are a printed coil and a handmade coil for conventional LF-EMAT, respectively. (c) is a handmade concentric meander-line coil designed for point-focusing.

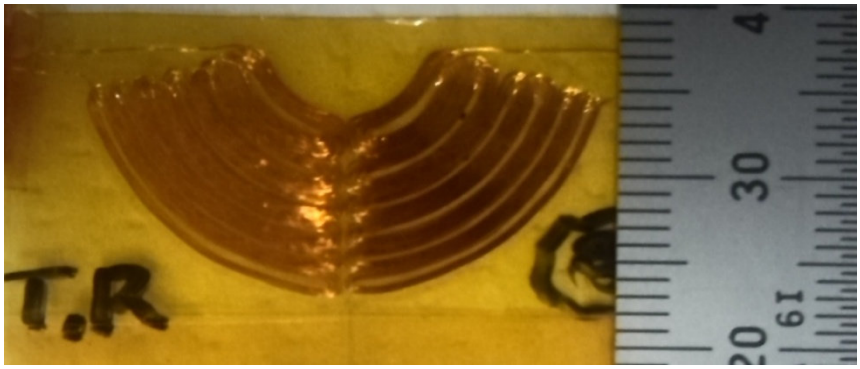


Fig. 2.10 Handmade coil for newly developed PF-EMAT.

実際に PF-EMAT を設計・製作する場合は，駆動周波数によって線音源の数，音源の間隔等を変える必要がある．板厚 20 mm のステンレス鋼材を想定した場合は h=20 mm であり，周波数 2.0 MHz であれば試料表面の各音源から焦点までの距離は，Fig. 2.6 において r_1=25.2 mm, r_2=24.4 mm, r_3=23.6 mm, r_4=22.8 mm, r_5=22.1 mm, r_6=21.3 mm, r_7=20.6 mm となるように設計した．2.0 MHz の周波数以外で駆動する PF-EMAT（1.1～3.0 MHz）においても各々同様に設計を行った．なお，いずれの EMAT

も永久磁石には正方体形状（15 mm×15 mm×17 mm（磁化方向））のネオジム鉄ボロン磁石（0.59 T）を用い，銅線は直径 0.1 mm のエナメル線を用いた．

開発した PF-EMAT では送信用と受信用にコイルを分離している．分離することにより，PF-EMAT を駆動した後に発生する不感帯を小さくできる効果が得られるからである．各送信用・受信用蛇行コイルの大きさはともに約 15 mm×15 mm である（コイル全体の大きさはおよそ 30 mm×15 mm）．PF-EMAT から超音波が送受信される模式図[32]を Fig. 2.11 に示す．

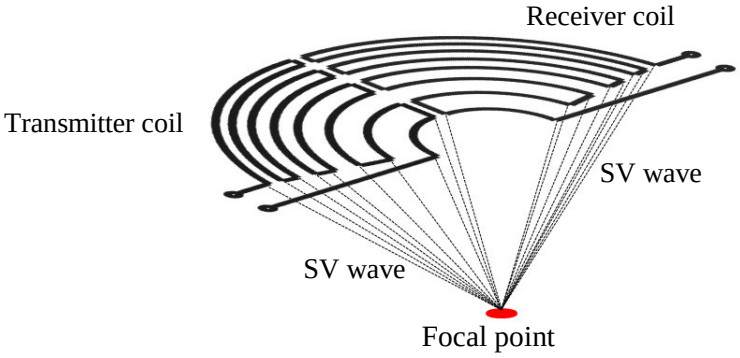
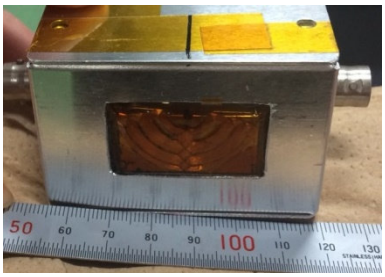
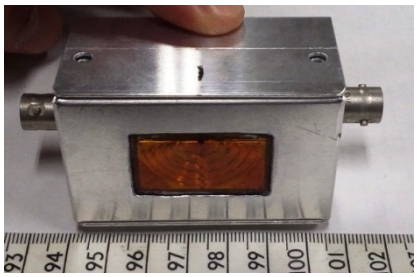


Fig. 2.11 Image of the point-focusing[32].

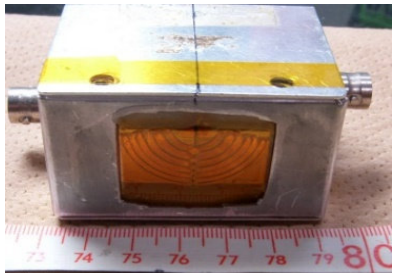
圧電型探触子を用いた UT をステンレス鋼材に使用する場合は，2.0 MHz 近辺[4),24)]を中心とした周波数が多用されている．実際の探傷で用いることができる最適な周波数を確認するため，2.0 MHz を中心に 0.5 MHz 毎に 5 つの PF-EMAT（1.1 MHz～3.0 MHz）を自作した．Fig. 2.12(a)-(e)に自作した PF-EMAT を示す．



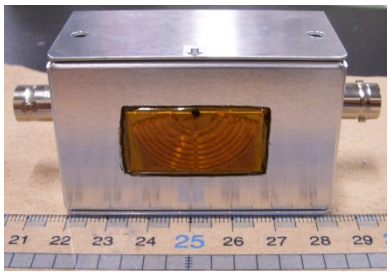
（a） 1.1 MHz



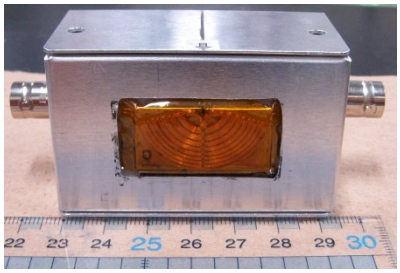
（b） 1.5 MHz



（c） 2.0 MHz



（d） 2.5 MHz



（e）3.0 MHz

Fig. 2.12 Developed PF-EMATs operated at different frequencies.

第 3 章 人工スリットを使った PF-EMAT の検出性能の評価

本章では，開発した PF-EMAT の性能評価のため，ステンレス鋼材に導入した人工スリットに対して，その検出性能を評価する．併せて PF-EMAT を使用するために必要なシステムを説明する．ここでは駆動周波数によるスリットの検出性能の変化や，圧電型探触子を用いた UT との性能比較，空間分解能に関する性能を評価する．また，探傷現場での適用を意識して，測定の再現性を低下させる種々の影響に係わる実験も行う．

3.1 超音波送受信システム及び試験片

超音波送受信システムは，Fig. 3.1 に示すようにハイパワーゲートアンプとスーパーヘテロダイン処理回路を内蔵したバースト波送受信装置（RAM-10000），プリアンプ，インピーダンスボックス，電流逆流防止のためのダイプレクサー，超音波反射波形の観察のためのオシロスコープ，バンドパスフィルタおよび PF-EMAT で構成される．

バースト波送受信装置から送信されたバースト電流は，ダイプレクサーを通過後 PF-EMAT に到達し，超音波を材料中に送信させる．何らかの反射源があればそこから超音波が反射され，PF-EMAT で受信される．受信された超音波は電流へ変換しプリアンプで増幅され，バンドパスフィルタを通過して再度バースト波送受信装置に戻り，オシロスコープで反射波形として観察することができる．受信振幅を測定する場合は，対象となる反射波形にゲートを設定し，ゲート範囲内でヘテロダイン処理を施し受信振幅の電圧値を測定する．

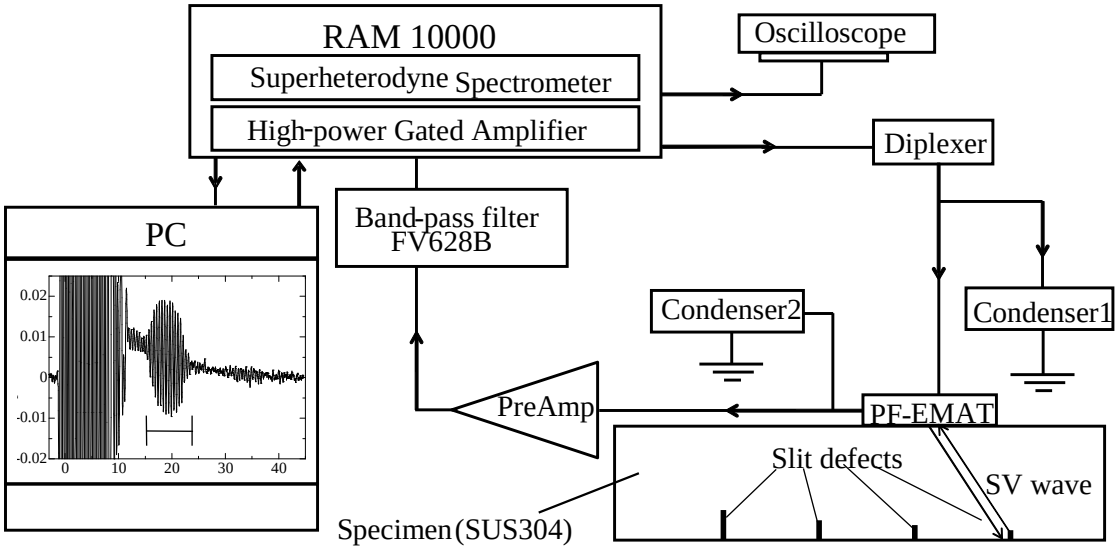


Fig. 3.1 Schematic of experimental setup.

用いた試験片はステンレス鋼材 SUS304（厚さ 20 mm）であり 3 体作製した．1 体は表面に深さの異なる垂直な SCC を模擬したスリット（深さ 0.5 mm～1.5 mm，幅 0.5 mm，長さ 10 mm）を放電加工により 3 箇所に導入した．もう 2 体はスリット（深さ 0.05 mm～2.95 mm，幅 0.5 mm，長さ 10 mm）を放電加工により併せて 18 箇所に導入した．後者の試験片での一例を Fig. 3.2 に示す．

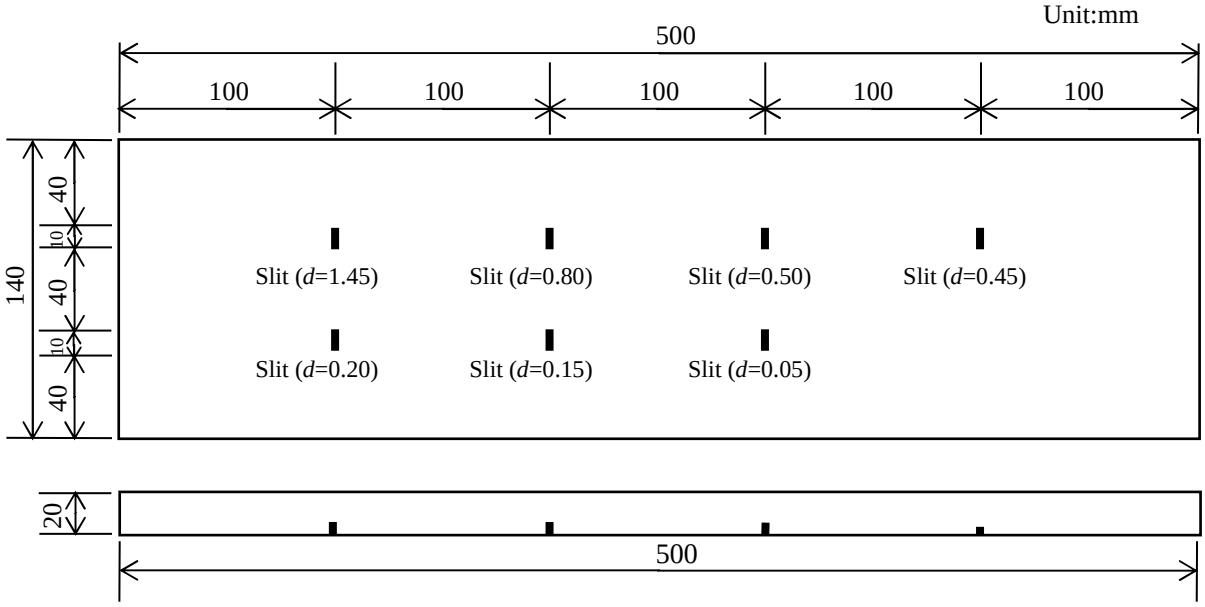


Fig. 3.2 Schematic of specimen. *d* is slit depth.

3.2 ステンレス鋼材でのスリット検出性能に係わる実験内容と結果

3.2.1 コイルの巻き数が受信振幅に与える影響

開発した PF-EMAT（2.0 MHz）のスリット検出性能確認のため，ステンレス鋼材（SUS304）にスリットを 3 つ加工（深さは 0.5 mm，1.0 mm，1.5 mm）した試験片を用い，ステンレス鋼材でのスリット検出実験を行った．PF-EMAT にはバースト波（2.0 MHz，バーストサイクル 12 回，バースト幅 6 μs）を入力し，受信された波形をオシロスコープ上で平均化処理（平均回数 16 回）を行い，スリットからの反射波の波形を確認した．ここで用いた試験片の概形図を Fig. 3.3 に示し，得られた検出波形を Fig. 3.4 に示す．

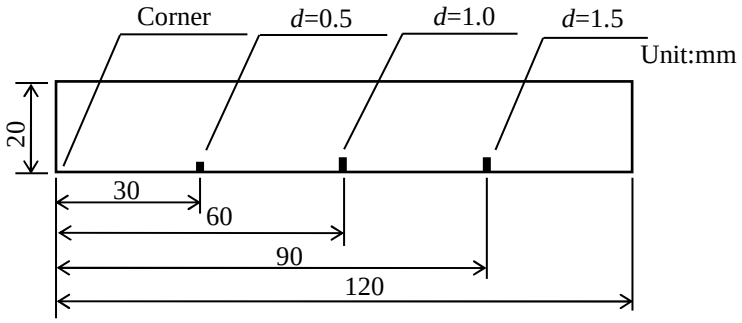


Fig. 3.3 Schematic of specimen. *d* is slit depth.

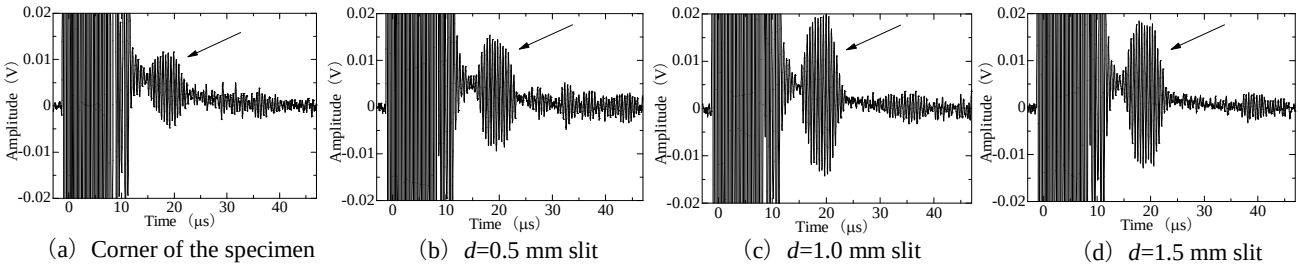


Fig. 3.4 (a)-(d) Typical waveforms received from corner of the specimen and slits (*d*=0.5, 1.0, and 1.5 mm), respectively[33].

Fig. 3.4 の結果より，深さ 0.5 mm のスリットを含む全てのスリットが明確に検出できた．当初，圧電型探触子を用いた UT での知見 [19),26)]から，スリット深さに概ね比例して反射波の振幅が変化すると予想された．しかし，開発した PF-EMAT では，Fig. 3.4(a)は試験片のコーナー部であり十分深いスリットに相当し，Fig. 3.4(b)-(d)は深さ 0.5～1.5 mm のスリットである．これらの振幅変化はスリット深さに比例しなかった [33)]．この要因については，第 5 章で詳細に調べる．

また，最初に各線音源が 1 本の銅線で構成されるコイルを作成して実験を行ったところ，スリットからの反射波を明確に検出することができなかった．よって，線音源からの出力を高めるため，1 ライン当りの銅線数を増加させた PF-EMAT を 2 つ作製し（Fig. 3.5），スリットの検出実験を行った．具体的には，1 ライン当りの銅線数を 8 本まで増加させたものと，銅線数が全て 4 本にしたものを作製した．その結果を Fig. 3.6 に示す．この結果より 8 本まで増加させた PF-EMAT のほうが，より高い振幅値が得られている．1 ライン当りの銅線を増加することによって式(3)に従わない線音源が増えるものの，放射面積とともに出力が増加しスリットからの振幅が増大する結果となった．よって，これ以降の実験では，この銅線数での PF-EMAT を実験に供した．

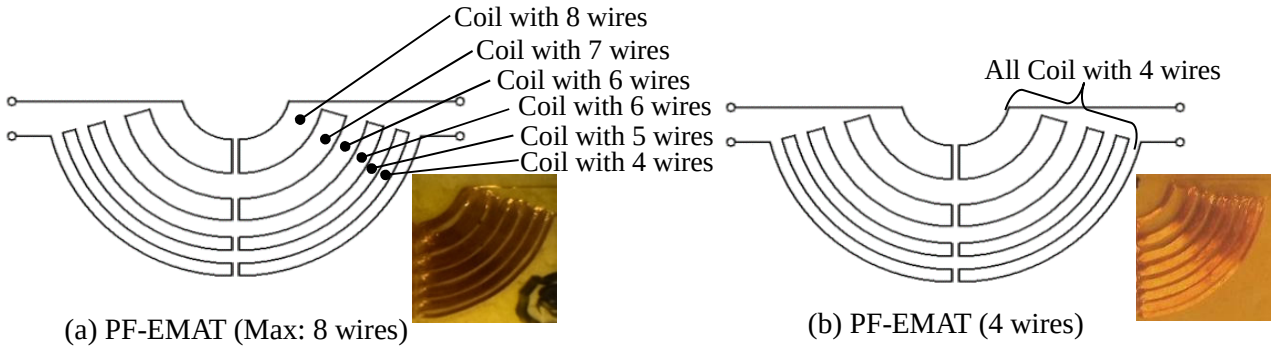


Fig. 3.5 (a), (b) Schematic of developed PF-EMATs.

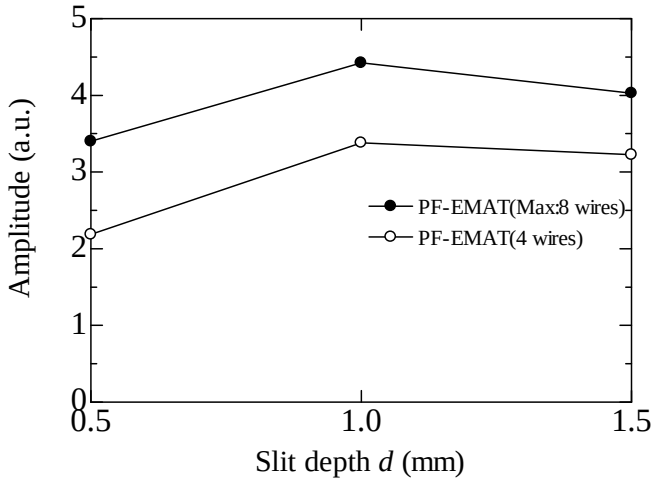


Fig. 3.6 Amplitude of received wave by the PF-EMATs.

3.2.2 駆動周波数によるスリット検出性能の変化

ここでは更なるスリットの検出性能の詳細な評価とスリット検出性能が最も高い周波数の選定を行う．そのために，18 個のスリット（深さ 0.05 mm～2.95 mm，幅 0.5 mm，長さ 10 mm）が導入されている 2 体の試験片と，駆動周波数が 1.1，1.5，2.0，2.5，3.0 MHz の 5 つの PF-EMAT を用いて実験 [34)]を行った．それぞれの PF-EMAT に供したバースト波のサイクル数は 4 回，8 回，12 回，12 回，12 回，バースト幅は 3.636 μs，5.333 μs，6.0 μs，4.8 μs，4.0 μs である．実験の際にはオシロスコープ上での反射波形を観察しながら PF-EMAT を手動で走査して，スリットからの反射が最大となる位置で

受信振幅を測定する. 各周波数での PF-EMAT の代表波形例を Fig. 3.7(a)-(e)に示し, 受信振幅を Fig. 3.8 に示す.

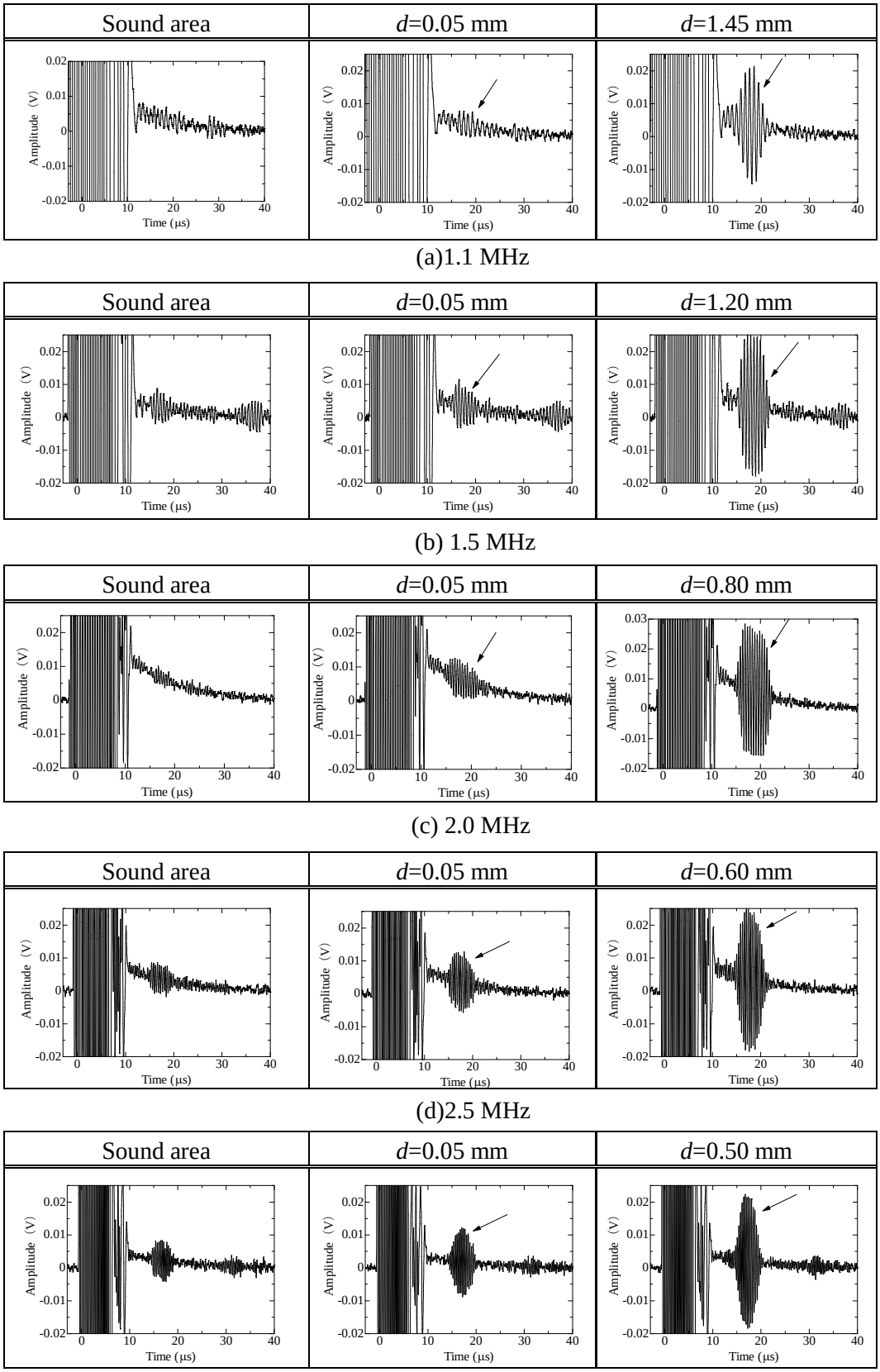


Fig. 3.7 Typical waveforms obtained from flawless area and slit defects measured by the five PF-EMATs. *d* is slit depth.

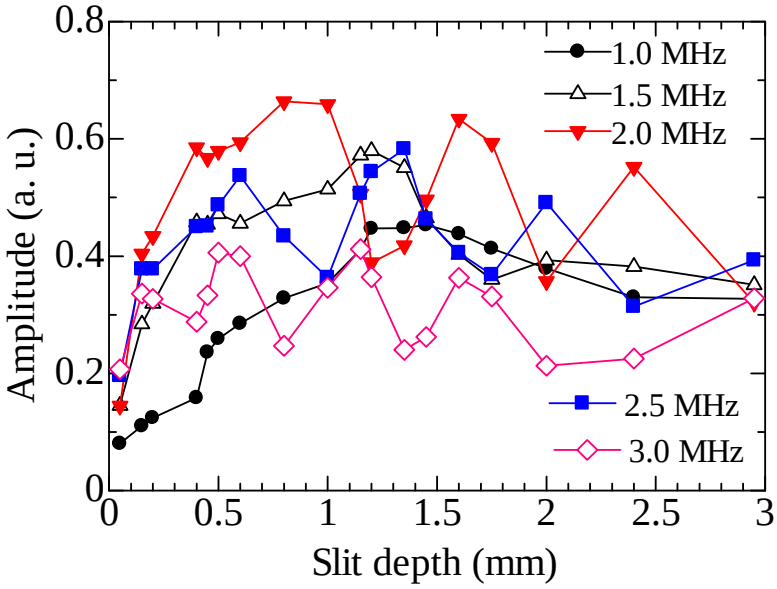


Fig. 3.8 Amplitude of received waves from slit defects at each driving frequency[32].

この結果より，各スリットの検出ができることが確認でき，ここでの最小検出スリット深さは 0.05 mm[9]であった．また，全体的に受信振幅がスリット深さに対して振動する傾向が見られ，高い周波数になるほどその傾向は顕著であった．Fig. 3.7 より 2.0 MHz 以外の全ての周波数では，健全部でもノイズ信号が見られ，*d*=0.05 mm のような小さいスリットでは識別が困難となる恐れがある．開発目的は 1.5 mm 以下の欠陥（SCC）の検出であるため，その寸法までの振幅を Fig. 3.8 より確認すると，一部で振幅に凹状が見られるものの 2.0 MHz がスリットからの振幅値が全体的に高い. 以上のことより，PF-EMAT の駆動周波数を 2.0 MHz と決定した.

3.2.3 圧電型探触子を用いた UT でのスリット検出実験

3.2.2 項で PF-EMAT ではスリット深さの変化に対して受信振幅が振動する傾向が認められたため，圧電型探触子を用いた UT との比較を行った．UT は確立した技術 [35]であり種々の探傷方法がある．ここでは実際に原子力発電所の供用期間中検査において，ステンレス鋼材の溶接部を対象に実施されている JEAC4207[4]を用いた方法でスリットの検出を試みた．具体的には以下の条件で行った．

超音波探傷器は，PWR 型原子力発電所で実際に使用されている UI-25 型を使用した．探触子は JEAC4207[4]では原則 45°での屈折角度を要求されており，この要求を満たす圧電型探触子（型式：MWB45-2E）を用いた．周波数はステンレス鋼材の溶接部の探傷で最も多用されている 2.0 MHz とした．つぎに，基準感度校正は Fig. 3.9 に示すように厚さ 20 mm のステンレス鋼材に JEAC4207[4]で要求されている φ2.4 mm の横穴を導入した．そこから反射エコー6/8S（基準感度）を探傷器の CRT 画面上 80 %に設定し，各位置からのエコー高さを基に距離振幅特性曲線（通称 DAC）を作成した．その条件を基に，再現性を十分に確認した上で各スリットからの最大エコー高さを求めた.

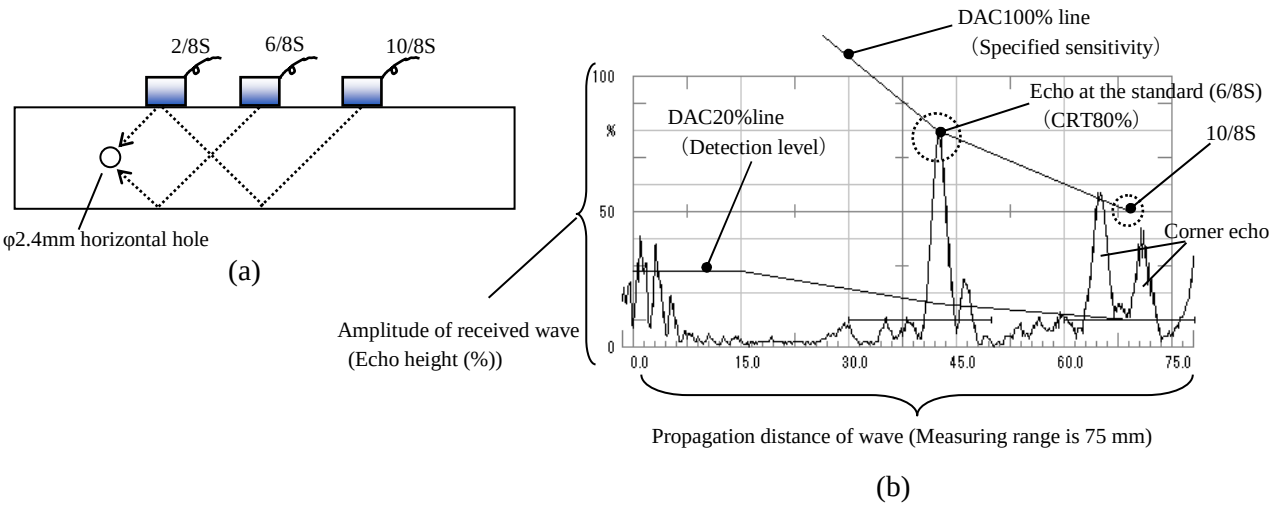


Fig. 3.9 Calibration with JEAC4207 code.(a) Calibration method and (b) typical wave from φ2.4mm horizontal hole.

Fig. 3.10 には, 各スリットからのエコー高さの変化を示す. 図中の Reflectivity of flaw geometry (Echo height)は，圧電型探触子を使ったときに直線溝形状（スリット）欠陥から得られるエコー高さ（反射能率）を表しており，式（4）で与えられる [19]．

$$\gamma = d\sin\theta\sqrt{\frac{2}{\lambda R_0}} \qquad (4)$$

ここで，λ は横波の波長，R_0 は探触子からスリットまでの距離，d はスリットの深さ，θ は入射角を示す．同式は圧電型探触子を使った UT では，エコー高さがスリット深さに比例することを示している．しかし，ここでの実験結果をみると深さ 0.4 mm と 0.8 mm 付近で僅かではあるが，PF-EMAT と同様にスリット深さの増加に伴ってエコー高さが振動（凸凹状）する様子が見られた．このことから，振幅の振動は PF-EMAT に特有の現象ではないことが推測される．

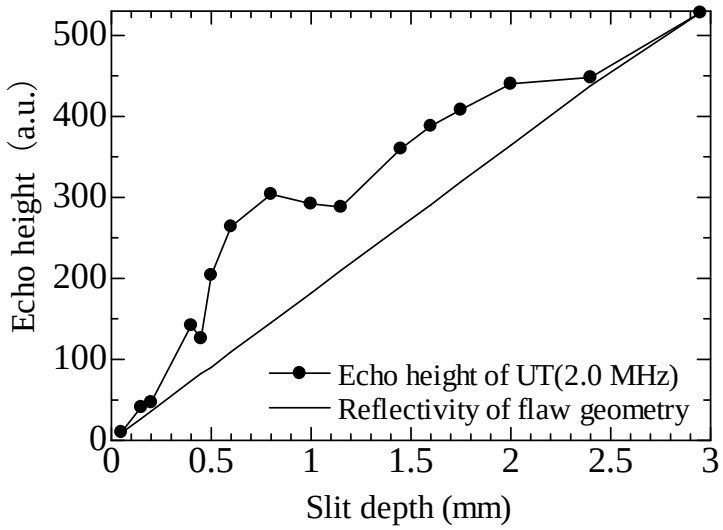


Fig. 3.10 Comparison between echo height and slit depth.

また，JEAC4207[4)]では，DAC20 %を越えたエコーを評価対象と規定しているが，Fig. 3.11 に示すように *d*=0.05 mm スリットでは DAC20 %以下のエコー高さであるため, 規格上では評価対象外である．PF-EMAT は DAC20 %のような閾値はないが，SN 比の裕度から *d*=0.05 mm のスリットも十分に検出可能である．以上の結果から，PF-EMAT は UT と比較するとスリットの検出深さ値が小さい．このことは，PF-EMAT が深さの小さい SCC を高感度で検出できることを示唆している．

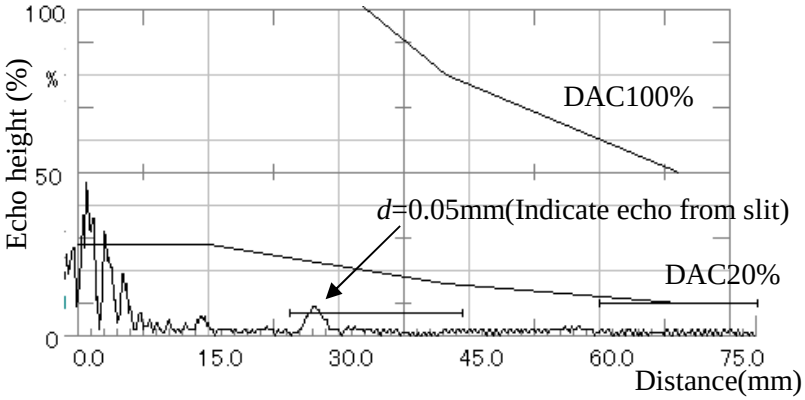


Fig. 3.11 Echo received from *d*=0.05 mm slit.

3.2.4 スリット周辺の空間分解能の評価

ここまでで，PF-EMAT の最小検出スリット深さ値，最適周波数等が分かった．しかし，探傷現場での適用を意識すると，SCC 寸法の形状表現等も重要な性能の一つとなる．そこで，スリット周辺における PF-EMAT の集束範囲を評価した. 具体的には, 最適周波数と判断された 2.0 MHz の PF-EMAT を用いて，スリットに対し直交方向（Fig.3.12 の挿入図に示す *y* 方向）に 1.0 mm 毎に走査し，ヘテロダイン処理された各振幅値を測定[9)]した．その結果を Fig. 3.12 に示す．これにより，スリットの前後方向に対して± 3.0 mm 程度の集束範囲を有していることが分かる．

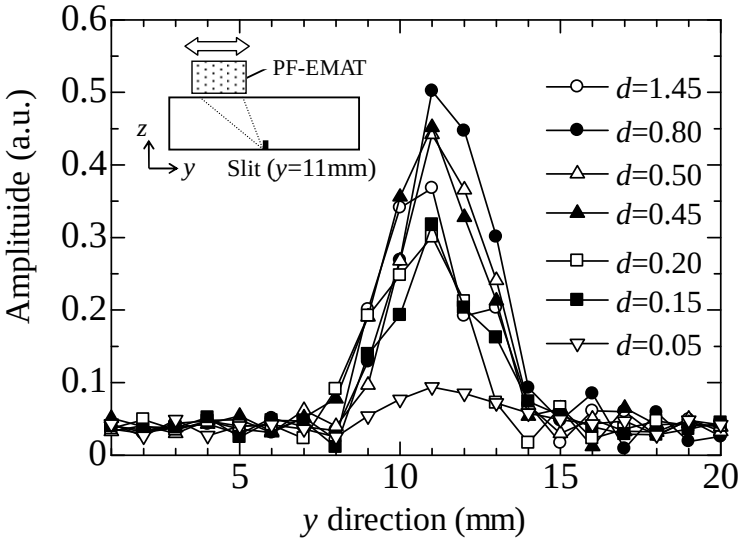


Fig. 3.12 Amplitude profile in the *y* direction [9)].

つぎに，PF-EMAT をスリットに対し平行方向（*x* 方向）に 1.0 mm 毎に走査した時の振幅値を測定結果[36)]を Fig. 3.13 に示す．スリットの長さは 10 mm であり，両端で振幅が徐々に変化している．この範囲は 4.0 mm 程度であり，*x* 方向には 4.0 mm 程度の分解能を有していることが分かる．

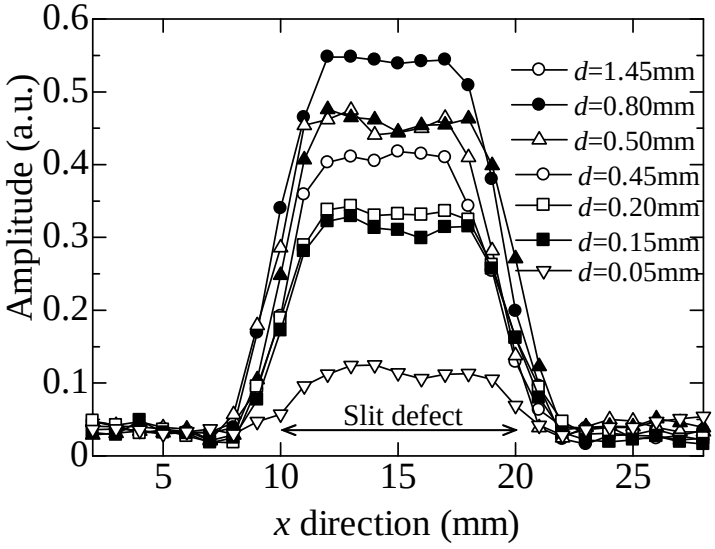


Fig. 3.13 Amplitude profile in the *x* direction [36].

3.3 溶接試験片でのスリット検出性能の評価

実際の探傷現場を想定して，溶接試験片に対してもスリットの検出実験を行った．使用試験片は Fig. 3.14 に示すようにステンレス鋼材（SUS304）を用いた突合わせ溶接継手で，V 開先（開先角度 60°）を加工し，TIG 溶接で接合後に余盛を削除した．その熱影響部には，深さ 0.15，0.29，0.51 mm，長さ 10 mm，幅 0.5 mm のスリットを放電加工により導入した．スリットの探傷方法は，PF-EMAT を溶接部とスリット（深さ 0.15 mm）を包含する範囲（20 mm×30 mm）で 1.0 mm 毎に振幅値を採取し，その振幅値データを画像化（マッピング）した．この結果よりスリットの検出性能を評価した．

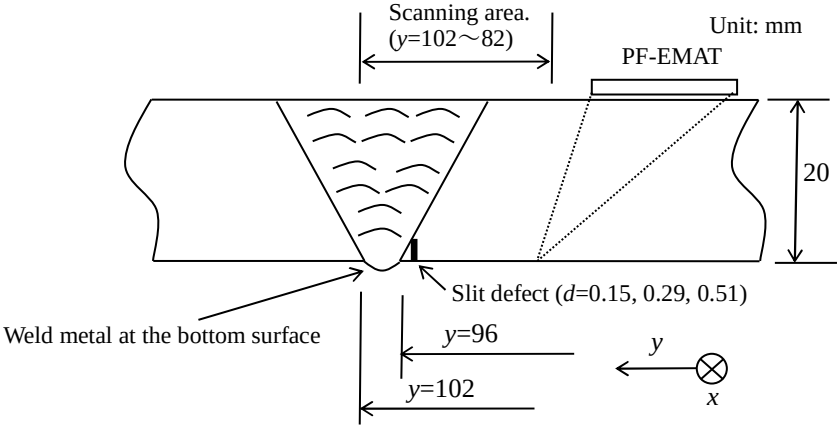


Fig. 3.14 Schematic of specimen. There are slit defects near the welded area.

深さ 0.15 mm のスリットに対する受信振幅マッピングの結果 [37]を Fig. 3.15 に示す．縦軸は溶接線に対して直交方向（*y*=82-102 mm）を示し，横軸は溶接線に対して平行方向（*x*=0-30 mm）を示している．ここで溶接部の範囲は縦軸 96-102 mm である．この結果から，深さ 0.15 mm のスリットを溶接部とは明確に区別して検出できることが分かった．

また，Fig. 3.16(a)には深さ 0.15 mm のスリットからの受信振幅が最大値となる位置を探し，*y* 方向に走査した時の振幅変化を示し，Fig. 3.16(b),(c),(d)には深さ 0.29 mm，0.51 mm，健全部で同様に測定した結果を示す．全てのスリットからの振幅値は溶接部からの振幅値に比べて有意に大きく，明確にスリットの検出ができている．

従来の圧電型探触子を用いた UT では，溶接部（特に裏波）からの反射エコーと SCC の識別に，一定以上の経験と技量が必要である．さらに，接触媒質を用いることにより，探触子走査時に接触媒質の量が変化し再現性が低下する．しかし，PF-EMAT を用いる場合，振幅値のマッピングをすることにより，スリットと溶接部（裏波）とが容易に識別できることが確認でき，検出感度の向上に加えて SCC と溶接部（裏波）の分別化の向上や再現性の向上が期待できる．この結果より，試験体表面を走査するだけで，比較的容易に SCC の検出が可能であることが示唆された．

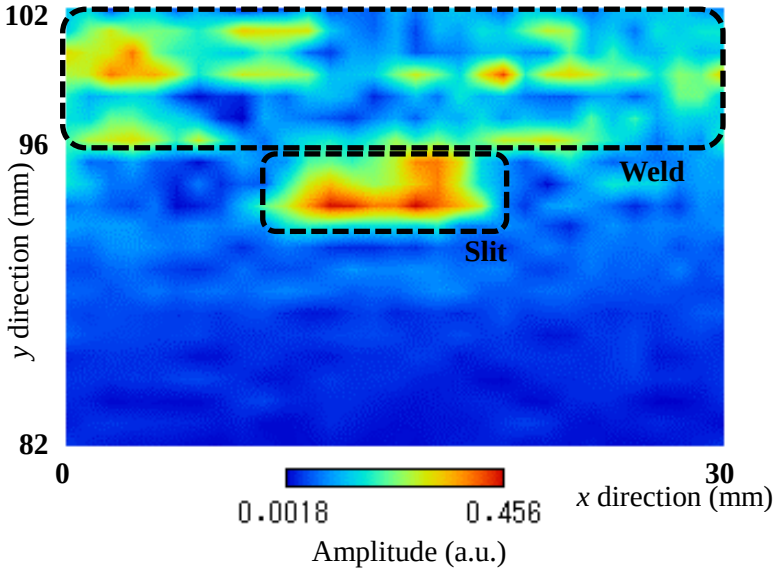


Fig. 3.15 Result of amplitude mapping for *d*=0.15 mm slit[37].

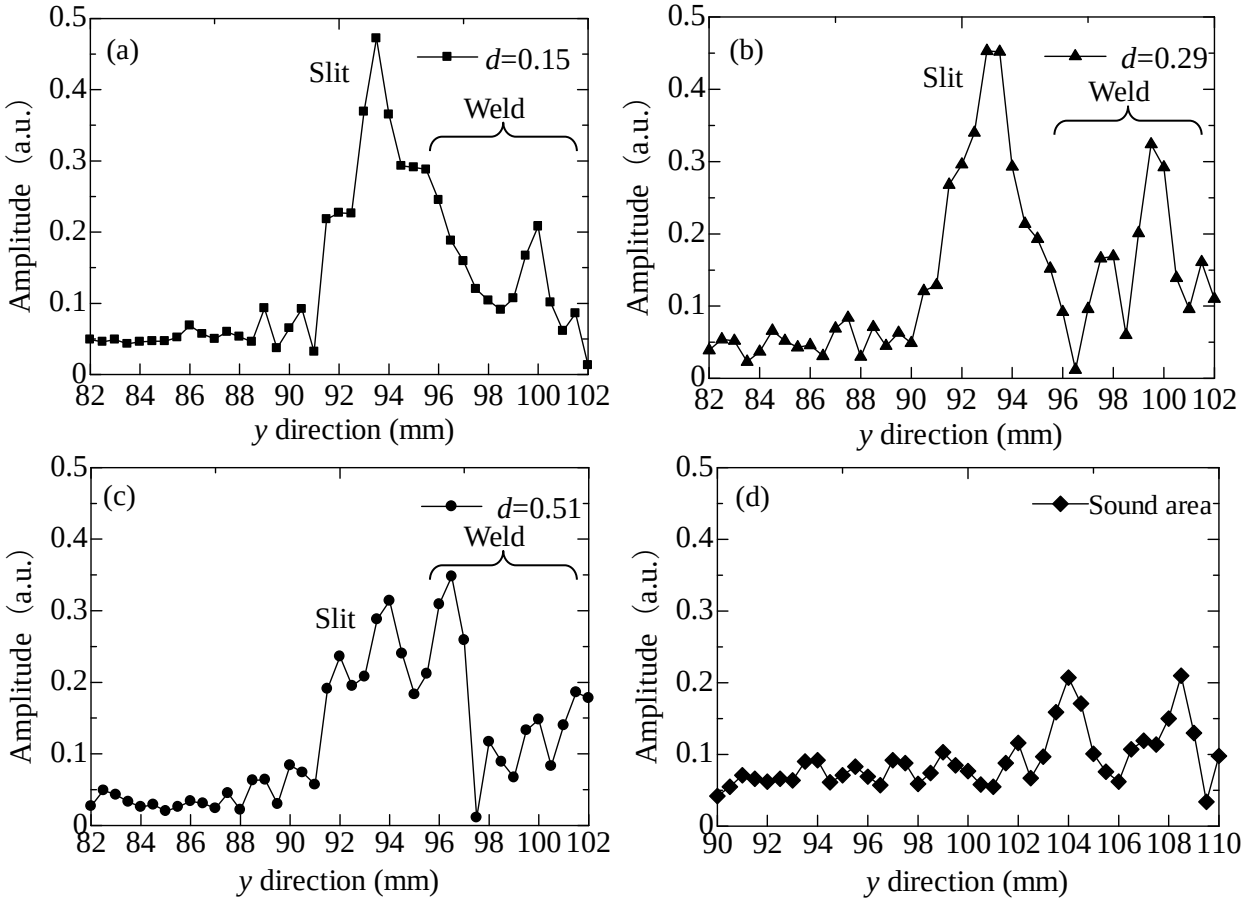


Fig. 3.16 Amplitude profile for each slit and sound area measured by PF-EMAT[37].

3.4 探傷現場で測定の再現性を低下させる要因の評価

探傷現場で生じる測定の再現性を低下させる要因として，SCC に対するセンサの傾きによる振幅変化，試験員の技量の影響，表面凹凸によるリフトオフの影響が主に想定される．これらの点で，圧電型探触子を上回る性能を有していなければ PF-EMAT が探傷現場で適用されることは困難である．ここでは，スリットが導入された試験片を用いて，PF-EMAT が傾いた場合の振幅変化，試験員の技量の影響，リフトオフの影響による振幅変化を確認した．

まず，PF-EMAT の傾きによる振幅変化を確認した．Fig. 3.17 の結果 [9]より，超音波の入射方向とスリットが直交する方向（θ=0°）において振幅が最大となり，±55°以上の範囲ではノイズレベルまで低下することが確認できる. 振幅が- 6.0 dB 以上になる範囲では±25°程度であり, ノイズレベルが約 0.05 であることから SN 比が 2 以上になる範囲は±40°程度である．なお，SN 比 2 以上であればスリットの検出は十分に可能である．一方，圧電型探触子を用いた UT では±15°程度 [38]の範囲で探触子を走査することが一般的である．PF-EMAT をこの範囲で走査した時の振幅変化の割合は，Fig. 3.17 の結果より- 4.0 dB 程度であるため，SN 比 2 以上を十分に確保している．よって，実用的には問題ないものと考える．

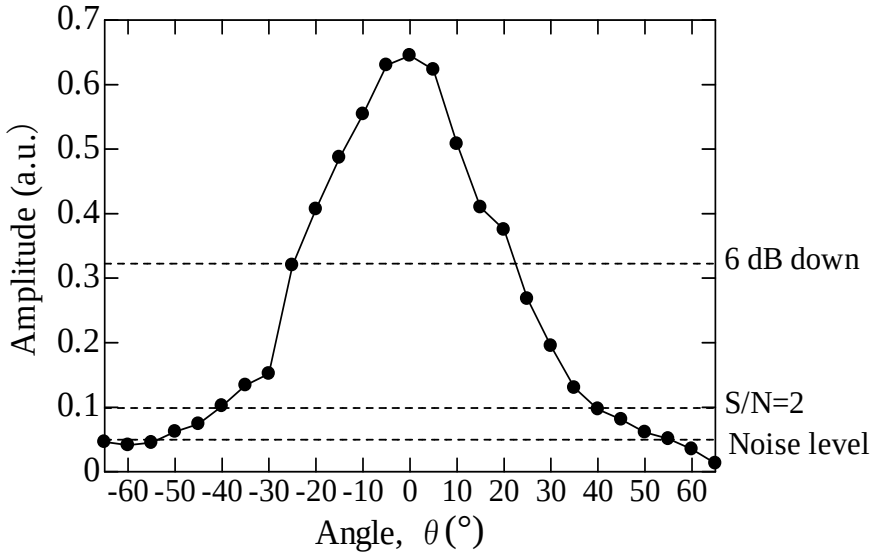


Fig. 3.17 Leaning angle dependence of echo amplitude for the *d*=0.80 mm slit[9].

つぎに，PF-EMAT の実験に従事している試験員 1 名と PF-EMAT に触れたことがない試験員 4 名の計 5 名（Examiner ① ～ Examiner ⑤とする）で，ブラインドテスト方式にて各スリットの最大振幅値を測定し再現性を確認した．各々の最大振幅値の測定結果 [9]を Table 3.1 に示す．この結果から，各スリットに対する異なる試験員による振幅値のばらつきは最大でも 1.15 dB である．圧電型探触子を用いた UT では，1.2 項に示したように±6.0 dB 程度のばらつきがあるとの考え方が支配的である．よって，PF-EMAT による探傷は技量に依存せず，高い再現性を実現できる．

Table 3.1 Maximum amplitude measured by five examiners[9].

Examiners	Slit depth（mm）						
	1.45	0.80	0.50	0.45	0.20	0.15	0.05
①(Volt)	0.447	0.607	0.501	0.499	0.365	0.351	0.120
②(Volt)	0.440	0.601	0.507	0.510	0.364	0.357	0.127
③(Volt)	0.429	0.607	0.518	0.505	0.382	0.360	0.131
④(Volt)	0.434	0.608	0.502	0.503	0.382	0.366	0.133
⑤(Volt)	0.431	0.608	0.525	0.518	0.383	0.368	0.137
Difference（dB）	0.36	0.10	0.29	0.32	0.44	0.41	1.15
Average（dB）	0.44						

最後に，PF-EMAT と探傷面の間に厚さ 0.1 mm のアクリルシートを挟み，リフトオフを模擬した間隔を付与する．リフトオフの間隔を変えながら d=1.45 mm のスリットに対してスリットと直交する方向（y 方向）に PF-EMAT を走査し，1.0 mm 毎に振幅を測定した．なお，コイルには，コイル保護と固定を目的とした絶縁テープ（厚さ：約 0.1 mm）が貼付されているため，実際のリフトオフはさらに 0.1 mm だけ大きい．

リフトオフを変えたときのスリットからの振幅値[9]を Fig. 3.18 に示す．この結果より，リフトオフが 0.3 mm 以下であれば，スリットの検出が可能である．圧電型探触子を用いた UT では，寸法が保証された人工欠陥を導入した対比試験片を用いて探傷を実施している．しかし，管理された対比試験片は表面に凸凹がなく，現場対象物の表面状態は加工に伴うきずや腐食等の影響により，対比試験片と同等である場合は極めて少ない．このことにより，圧電型探触子を用いた UT での探傷時にはエコー高さが低下し，検出できる SCC には制限が与えられる．ここで示したように PF-EMAT では，リフトオフが 0.3 mm 程度までのスリットからの受信信号の識別が可能である．これは，PF-EMAT が探傷現場において表面状態の影響を受けにくい手法であることを示唆している．

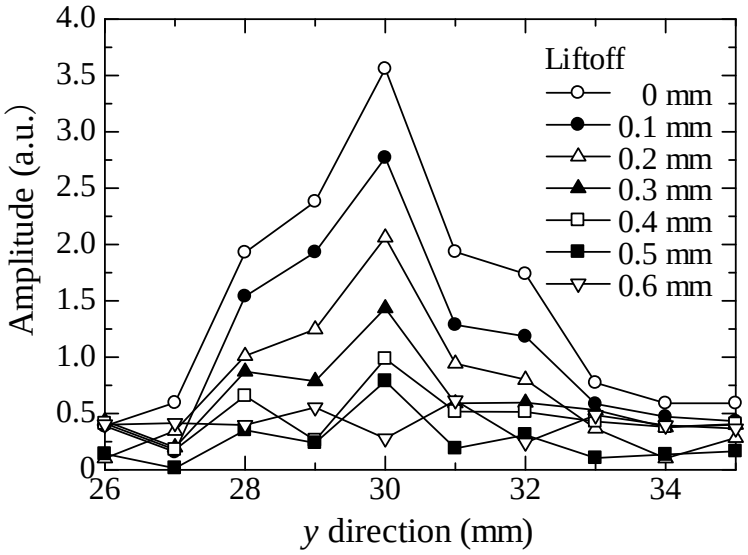


Fig. 3.18 Liftoff dependence of echo amplitude[9].

3.5 人工スリットの検出性能に対するまとめ

第 3 章では，以下の新たな知見を得ることができた．

（1）新たに開発した PF-EMAT により，超音波の伝搬特性が低下するステンレス鋼材に対しても，深さ 0.05 mm のスリットを明確に検出できた [9]．なお，スリット検出性能が最も高い周波数は 2.0 MHz であることが分かった．

（2）PF-EMAT では受信振幅がスリット深さに比例しなかった [33]．

（3）スリット廻りの空間分解能は，スリットの幅方向に± 3.0 mm 程度 [9]，長さ方向に 4.0 mm 程度 [36] であり，精度の高い SCC 形状の表現が期待できる．

（4）ステンレス溶接試験片に導入した深さ 0.15 mm のスリットを明確に検出できることが分かった．これにより，実際の溶接部の探傷でも圧電型探触子を用いた UT と同等の検出性能が期待できる [37]．

（5）圧電型探触子を用いた UT では, SCC と溶接部（裏波）の識別に経験と技術を要するが, PF-EMAT を用いて振幅値のマッピングをすることにより，スリットと溶接部（裏波）とが容易に識別できた [37]．

（6）現場での探傷を考えた場合，SCC に対してセンサが傾く場合も想定される．この確認を行った結果，SN 比が 2 以上となるセンサの傾きは± 40°程度の範囲であり，実際の探傷には影響を与えにくいことが分かった [9]．

（7）未熟練の試験員でのスリット検出のばらつきは，最大でも 1.15 dB であり，高い再現性を実現することができた．PF-EMAT を用いた探傷では技量の程度に依存しにくいことも分かった [9]．

（8）リフトオフ量が 0.3 mm 以下であればスリットの検出が可能である [9]．

以上のことより，PF-EMAT のスリットの検出深さ値が小さく，探傷現場で測定の再現性を低下させる影響についても非接触で接触媒質を用いない PF-EMAT の優位性が期待できる．よって，PF-EMAT はスリットの検出性能が高く，実際の探傷現場においても SCC の検出能力が高い非破壊手法であるものと評価できる．

第 4 章 SCC の検出性能の評価

第 3 章までで，人工的に作製したスリットを用いて PF-EMAT の性能評価を行った．この章では，さらなる PF-EMAT の探傷現場への適用を意識して，人工的に導入した SCC の検出実験を行う．この実験では 2 種類の試験片を用いた．1 つはステンレス鋼材に SCC が導入された平板状試験片 [39]で,もう 1 つは溶接部近傍に SCC を腐食環境において発生させた配管状 SCC 試験片である．これらの試験片に対して，PF-EMAT を用いて SCC の検出実験を行い，その検出性能を評価する．

4.1 平板状 SCC 試験片での検出実験結果

4.1.1 試験片の概要

Fig. 4.1 に全ての平板状 SCC 試験片の写真を示し，Fig. 4.2 には試験片の寸法を示す．なお，試験片は 4 体あり，材質は全て SUS304 である．これを腐食液に浸した状態で曲げ応力を負荷することによって人工的に SCC を発生させている [39]．それぞれ A5，B5，T1，T4 と記し，SCC 深さの概要を Table 4.1 に記す．

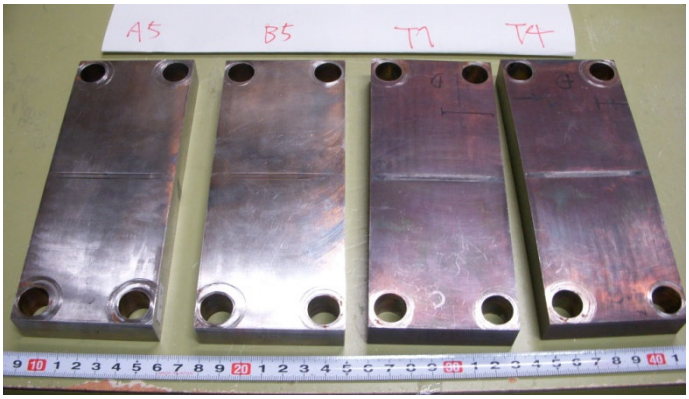


Fig. 4.1 Picture of the upper surface of the specimens.

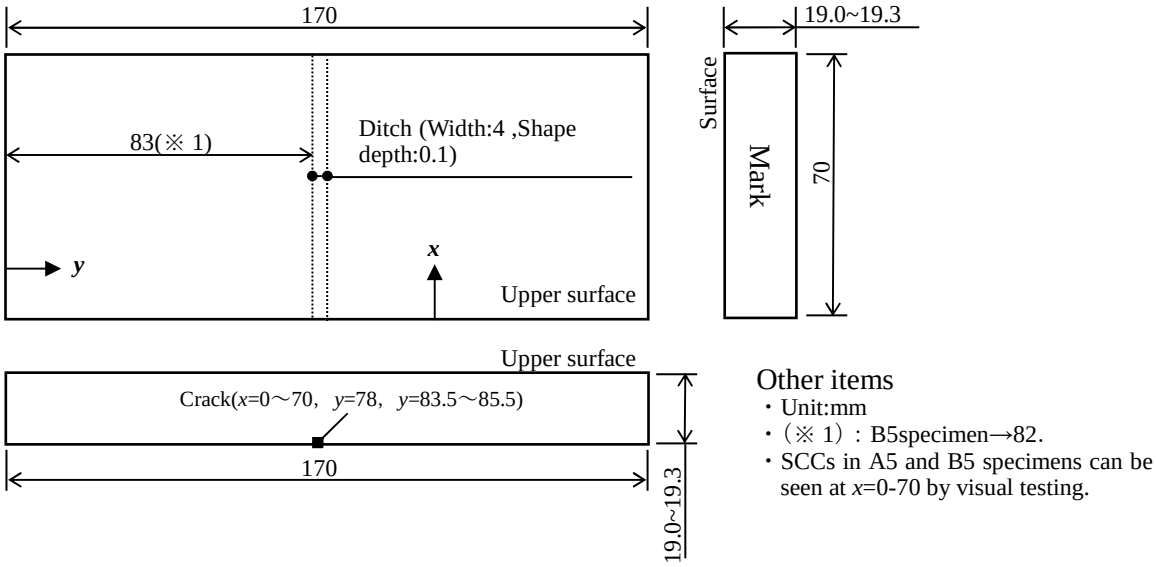


Fig. 4.2 Schematic of the specimens.

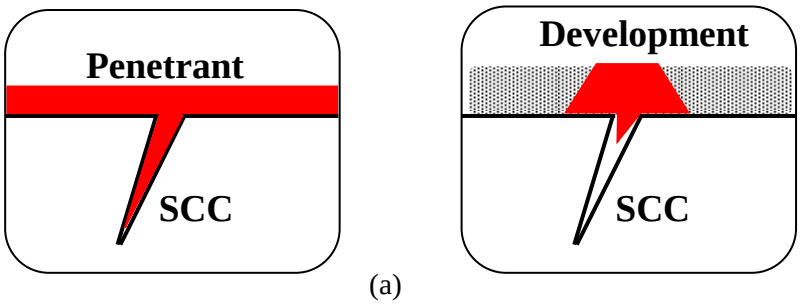
Table 4.1 SCC depth measured by different methods.

Unit：mm

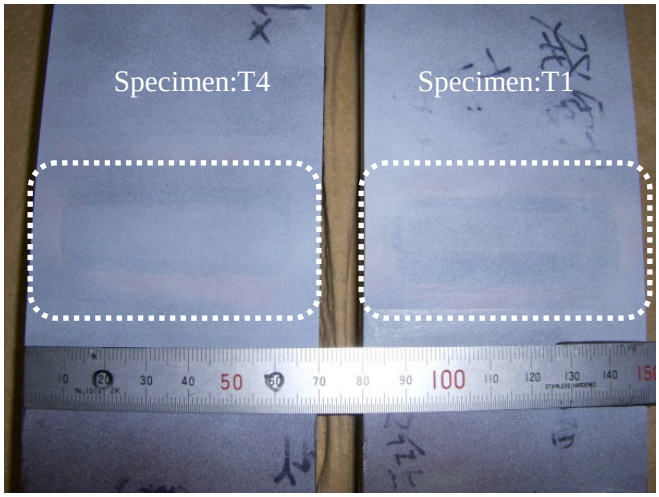
Specimen	Phased array piezoelectric transducer	Tip echo technique by piezoelectric transducer (5.0 MHz, 45°)	Visual testing at the side surface		Note
			Left side	Right side	
A5	～ 5.0	3.7(x=35)	3.5	1.5	SCC is seen at x=0-70 by VT.
B5	～ 6.0	5.6(x=65)	2.5	7.0	SCC is seen at x=0-70 by VT.
T1（※）	Impossible	Impossible	Impossible	Impossible	Echo can't be received by UT.
T4（※）	～ 2.0	Impossible	Impossible	Impossible	Echo can be received by UT.

これらの試験片に対して，浸透探傷試験（Penetrant Testing　以下 PT とする）で SCC の観察を行った. ここで PT の原理を Fig. 4.3(a)に示す. 本手法は染色液の SCC への浸透と毛細管現象を利用して，表面に開口した SCC を拡大して観察する手法である．目視での検出が簡便に行えるため，原子力発電所を始めとする各プラント構造物の保守検査における表面探傷で多用されている [8]．Table 4.1 中に（※）で示す T1，T4 試験片は，Fig. 4.3(b)に示すように SCC 発生位置（Fig. 4.3(b)の破線で囲まれた部分）に PT を実施したところ，SCC による指示模様を認めなかった.

また，事前の圧電型探触子を用いた UT（2.0 MHz，45°）では，T4 試験片で x=50-60 mm の範囲において指示エコーを認め，T1 試験片では認めなかった．よって，T1 試験片は SCC が認められなかったので今回の実験には用いていない．なお，Table4.1 中の Phased array piezoelectric transducer とは後述するフェイズドアレイセンサによる UT であり，SCC 深さの測定に多用されている [40]．Tip echo technique by piezoelectric transducer とは圧電型探触子を用いた UT で，SCC 先端部からの微弱なエコーの位置を測定し SCC 深さを測定する方法である.



(a)

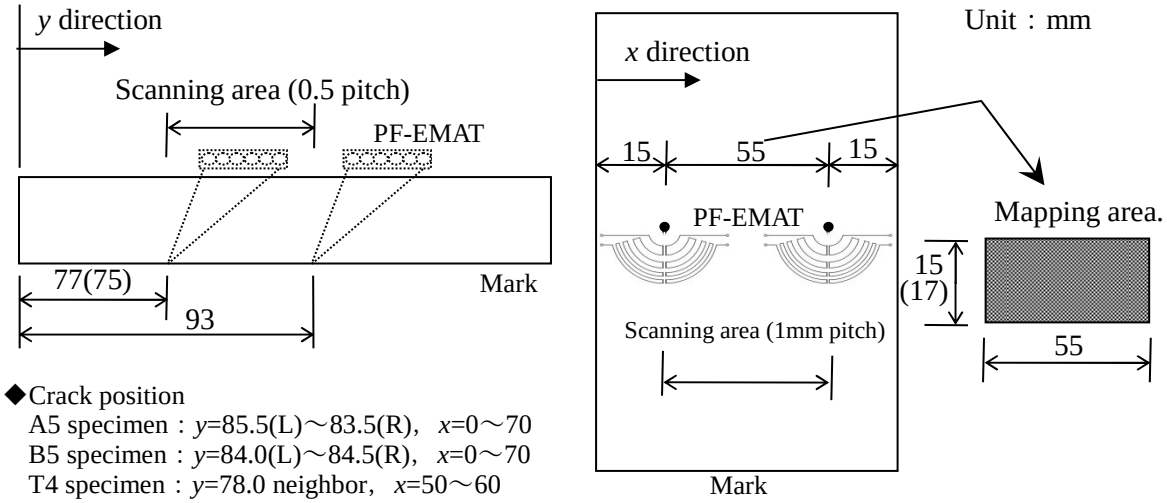


(b)

Fig. 4.3 (a) Principle of penetrant testing, and (b) results of penetrant testing for T4 and T1 specimens.

4.1.2 PF-EMAT を用いた SCC の検出

ここでは 2.0 MHz の PF-EMAT を用い，スリットでの実験と同一条件で A5，B5 試験片の SCC 部周辺に対して，*x*（横）方向には 1.0 mm ピッチで，*y*（縦）方向には 1.0 mm ピッチ（中心部は 0.5 mm ピッチ）で走査し，受信振幅値のマッピング（*x*=15-55 mm（A5，B5），*y*=77-93 mm（A5），*y*=75-93 mm（B5））を行った．これらの測定条件の概要を Fig. 4.4(a),(b)に示す．また，T4 試験片では，Table 4.1 に示したように事前の圧電型探触子を用いた UT での結果から SCC は小さいものと推定されたため，受信振幅値のマッピングは UT での指示箇所である *x*=47-55 mm, *y*=76-83 mm の範囲で行った. なお，いずれの試験片においても PF-EMAT の構造上, 両端部 15 mm の範囲は確認範囲外とせざるを得なかった.



(a) *y* direction.　　(b) *x* direction and mapping zone.

Fig. 4.4 Experimental setup for A5 and B5 specimens.

A5 試験片での実験結果を Fig. 4.5 に，B5 試験片での実験結果を Fig. 4.6 に示す．図中の破線は目視で観測された SCC 位置である．それぞれ最大の SCC 深さは 5.0 mm，7.0 mm である．この結果から両者ともに SCC を全ての範囲で検出できた.

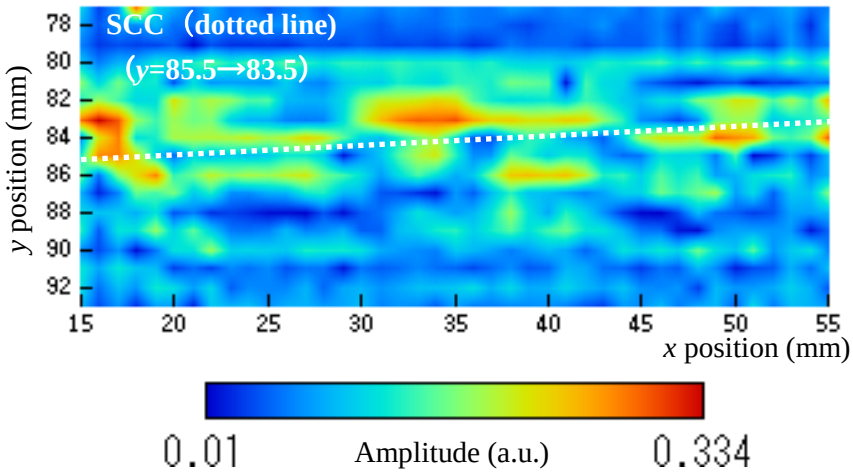


Fig. 4.5 Amplitude mapping around SCC in A5 specimen.

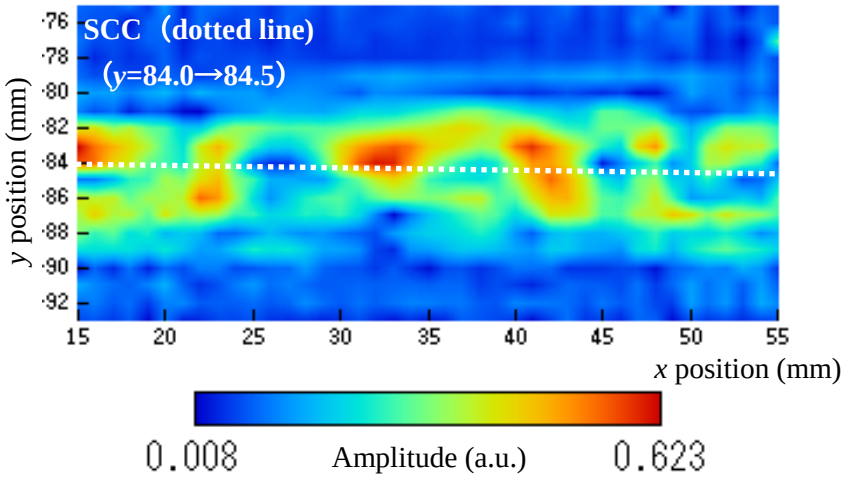


Fig. 4.6 Amplitude mapping around SCC in B5 specimen.

PT において SCC の指示模様を認めなかった T4 試験片に対する実験結果を Fig. 4.7 に示す. さらに, x=54.5 mm での y 方向に関する受信振幅分布を Fig. 4.8 に，健全部と SCC の代表波形を Fig. 4.9 に併せて示す. 以上の T4 試験片での結果から，振幅高さに変化はあるものの SCC を全ての範囲で検出できていることが確認でき，代表波形からも SN 比に十分余裕をもって SCC の検出ができていることが分かる.

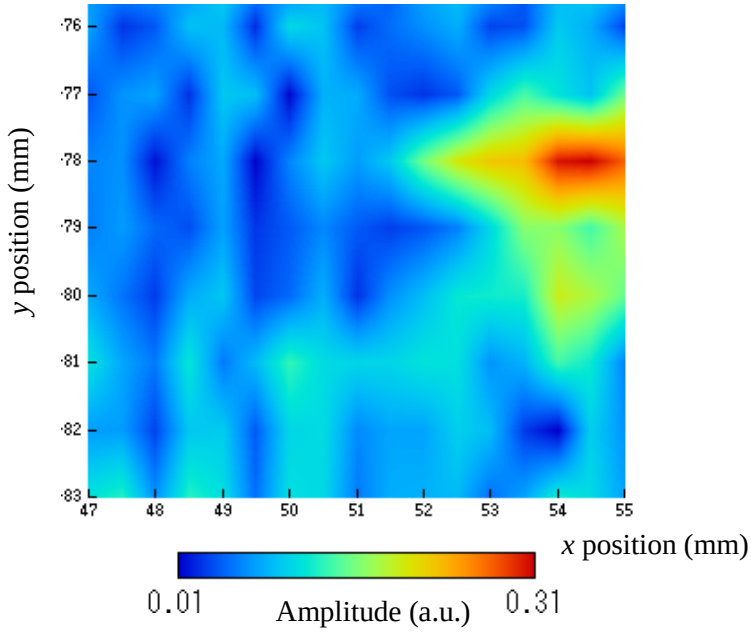


Fig. 4.7 Amplitude mapping around SCC in T4 specimen.

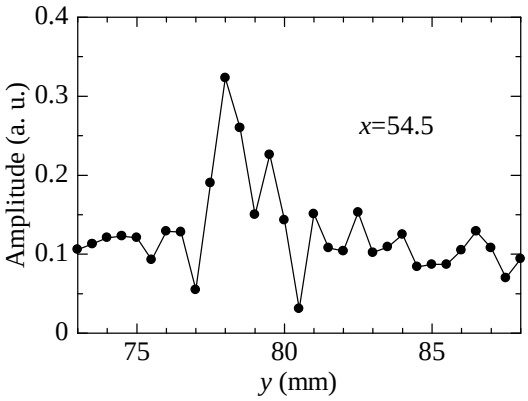


Fig. 4.8 Amplitude profile in the *y* direction.

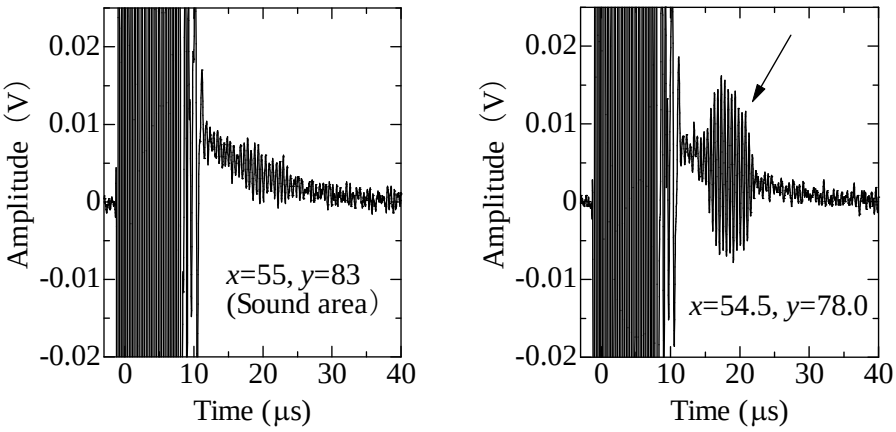
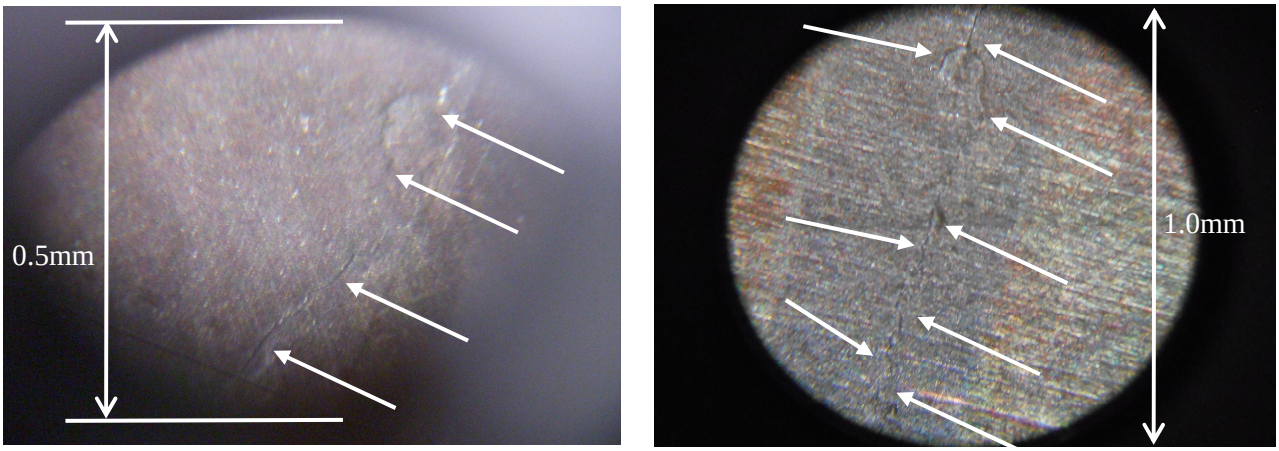


Fig. 4.9 (a), (b) Typical waveforms obtained from sound area and SCC, respectively.

また，この T4 試験片は当初の PT での結果から SCC が検出できなかったが，ルーペでの精密調査により，*x*=51.5-60.5 mm，*y*=78 mm の位置において，SCC を目視で検出できた．Fig. 4.10 に示すように，この SCC の形態は極めて開口幅が狭く（概ね 0.01 mm 以下），1 本の SCC が直線状に存在しているのではなく，途切れた形態を示す複雑な SCC であることが分かった．SCC の深さはかなり小さいものと推定され，SCC の範囲は PF-EMAT や圧電型探触子を用いた UT の結果と合致した．このように，PT で検出ができなかった SCC に対しても，PF-EMAT では高感度で検出することができる．



(a) (b)

Fig. 4.10 Results of visual testing for T4 specimen using a loupe.

4.2 配管状試験片の SCC の検出実験結果

ここでは，溶接部近傍に薬品で内面に SCC を発生させた配管状試験片（4N-1）に対し，SCC の検出を試みる．Fig. 4.11 に試験片の写真（内面）を示し，PF-EMAT による検出実験は外面から行う．なお，本試験片の仕様は，呼び径 600A（24 インチ）の配管状，溶接部厚さ 35 mm，材質は SUS316 である．

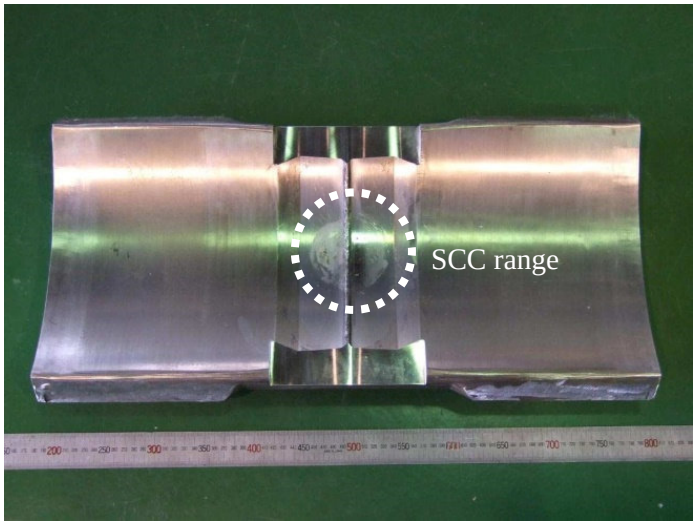


Fig. 4.11 Picture of the inner surface of the specimen.

Fig. 4.12 には試験片製作時の PT による目視結果を示す. 溶接部近傍に線状の SCC を示す指示模様が現れている．この結果を基に，PF-EMAT での実験前に PT を再度行った．ここでは通常より長い浸透時間（30 分），現像時間（30 分）で実施したが，SCC の検出は困難であった．一般的には PT を数回程度行っても概ね同様の指示模様が観察されるが，この試験片では再現性が確認できなかった．この結果は SCC の開口幅が狭く，微細な SCC であることを示唆している．

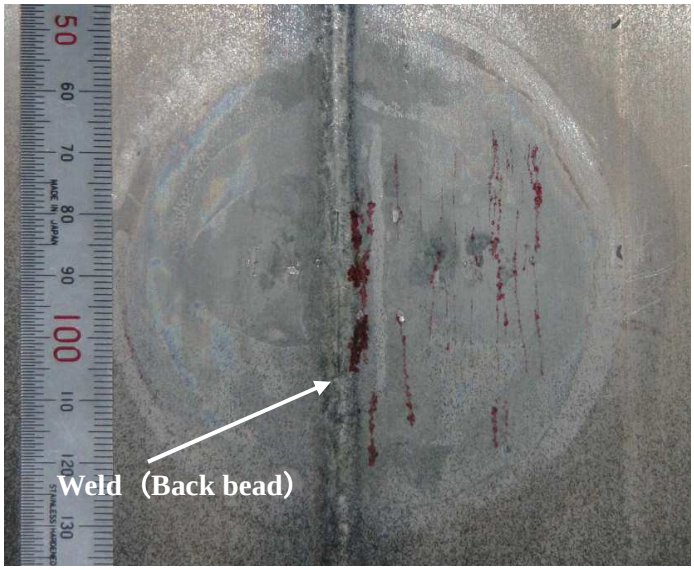


Fig. 4.12 Results of PT .

4.2.1 圧電型探触子を用いた UT での SCC の検出

圧電型探触子（MWB45-2E 型）を用いて，Fig. 4.13 の SCC②および SCC③に対して，*y* 方向のエコー高さの変化（走査ピッチは 1.0 mm）を求めた（Fig. 4.14）．SCC②および SCC③は溶接部近傍にあり，実機と同じような SCC 発生位置に存在する．圧電型探触子を用いた UT での代表波形例を SCC②では Fig. 4.15 に，SCC③では Fig. 4.16 にそれぞれ示す．PT 結果から開口幅が狭く微細な SCC と推定していたが, SN 比に十分余裕をもって SCC②および③が検出できた. SCC の深さは不明であるが, UT での検出限界が深さ 1.5 mm 以上と言われている [5]. ここでは SCC の検出ができているので, SCC②および③はこれ以上の深さを有しているものと推定される.

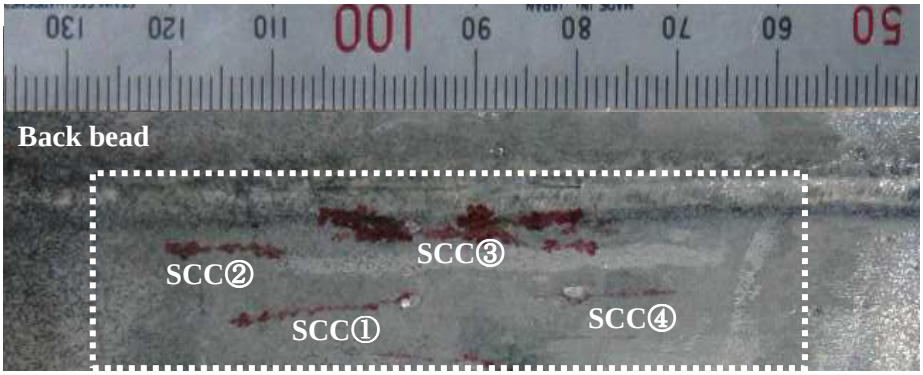


Fig. 4.13 Result of PT(zoom).

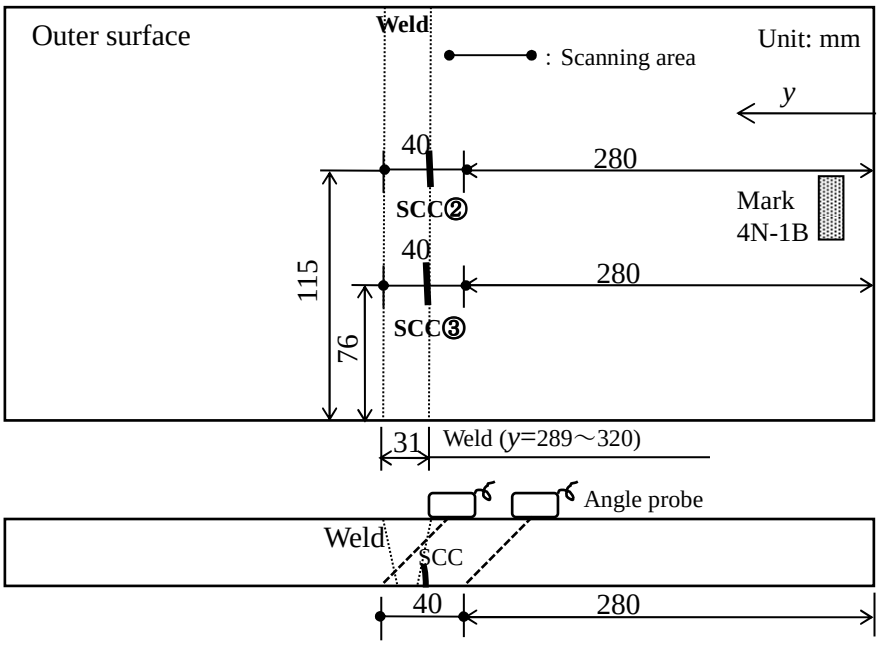
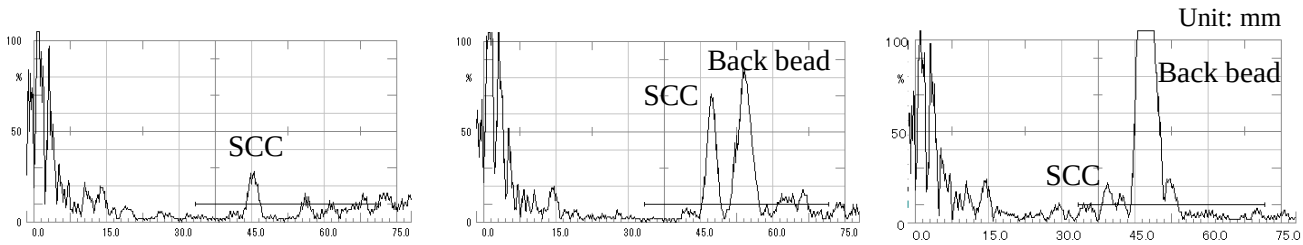
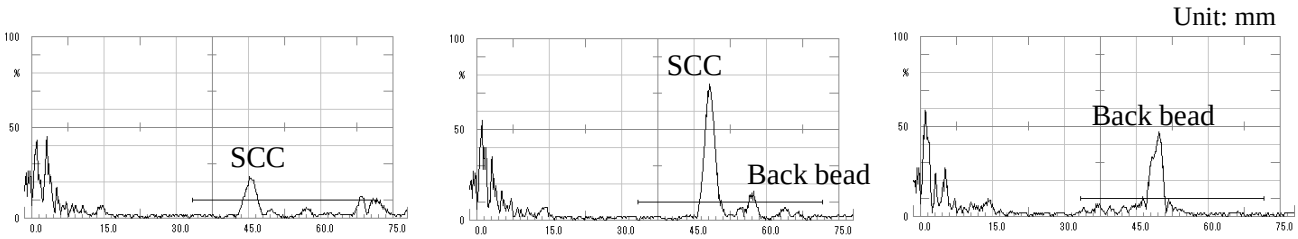


Fig. 4.14 Scanning area in the *y* direction by piezoelectric transducer.



(a) *y*=280 (b) *y*=292 (c) *y*=303

Fig. 4.15 (a)-(c) Echo obtained from SCC② at *y*=280, 292, and 303, respectively.



(a) *y*=280 (b) *y*=292 (c) *y*=303

Fig. 4.16 (a)-(c) Echo obtained from SCC③ at *y*=280, 292, and 303, respectively.

4.2.2 フェイズドアレイを用いた UT での SCC 深さ測定

フェイズドアレイを用いたUT（以下，PAとする）でもSCCの検出と深さ測定を試みた．通常の圧電型探触子では1つの振動子から超音波を発振し，反射波を受信することでSCCの検出を行う．しかし，フェイズドアレイは多数の振動子により構成され，それぞれの振動子が超音波を送受信する時間を独立に制御することで超音波ビームの制御を行う．これにより超音波の入射角度や焦点位置を任意に変えることができるため，狭隘部の探傷やSCC深さの評価に多用されている．特にSCC深さの測定には多くの実績を有しており，原子発電所でのSCC深さ評価に多用されている[4),6),40)]．

このPAでのSCC検出の結果[41)]をFig. 4.17に示す．ここでのPAは3.0 MHzでSV波を使用し，センサ数32 ch，入射角度35°-88°である．圧電型探触子を用いたUTで検出したSCC②および③はPAでも全て検出できているが，Fig. 4.18のSCC深さの測定例（SCC④および②）に示すように，SCCの先端部からの信号が明確に得られていないため，PAの結果から全てのSCCは深さがほとんどない浅いものであると推定される．

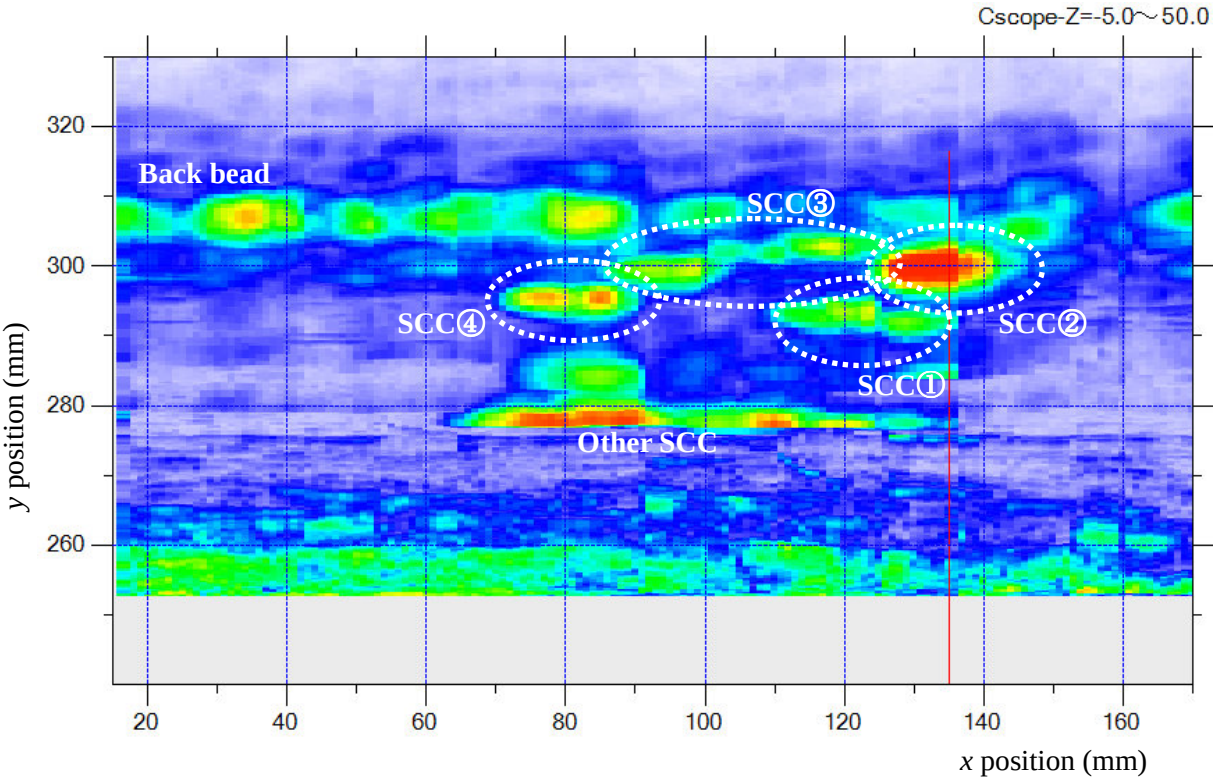
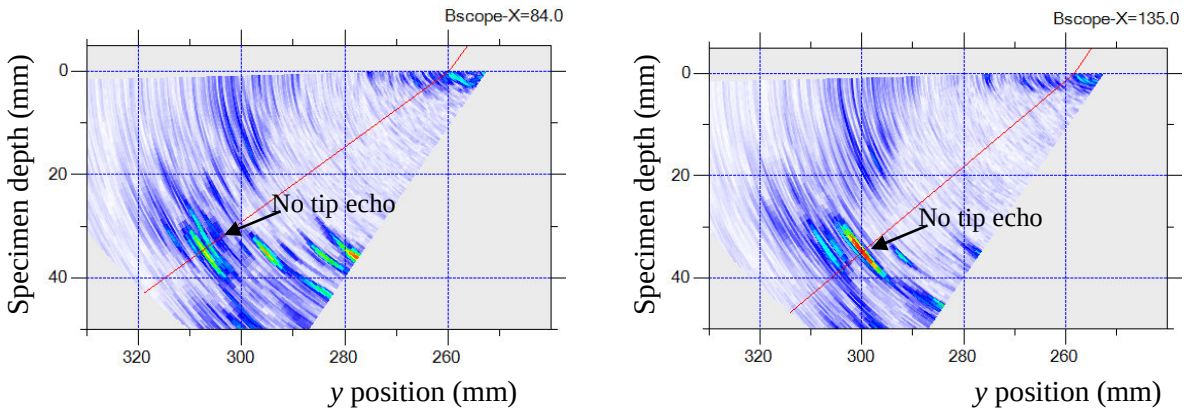


Fig. 4.17Amplitude mapping using the phased array piezoelectric transducer.



(a) SCC④ (b) SCC②

Fig. 4.18 Phased array measurement results from (a) SCC④and (b) SCC②.

4.2.3 PF-EMAT を用いた SCC の検出

Fig. 4.13 に示した PT による結果を基に SCC②および③を中心に，PF-EMAT で振幅マッピングデータの採取を試みた [41]．PF-EMAT については，式（3）にしたがって，この試験片厚さに合致する焦点深さ 35 mm の PF-EMAT を作製した．ここでは配管の曲率は無視している．また，SCC の高出力化のために巻数を増やし，送信・受信側に各 1 個の磁石を配置した．Fig. 4.19 にはここでの実験で用いた PF-EMAT を示す．この PF-EMAT を用いて，Fig. 4.13 の点線内について 1.0 mm ピッチで振幅値を採取しマッピングを試みた．

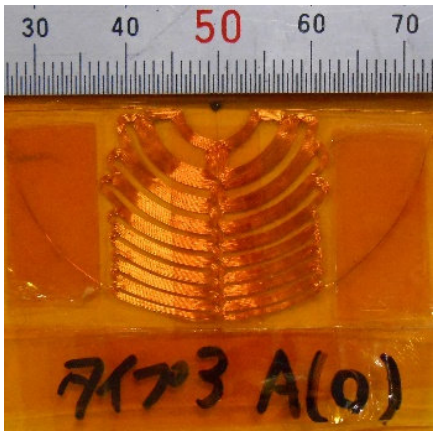


Fig. 4.19 PF-EMAT for stainless steel pipe of 35mm thickness.

Fig. 4.20 の振幅値のマッピング結果 [41]より，SN 比に余裕をもって各 SCC の検出ができることが分かった．3.3 項の溶接試験片の実験内容でも記したが，PF-EMAT で試験体表面を走査し振幅値のマッピングをすることにより，比較的容易に SCC の検出が可能であることを本結果は示唆している．また，SCC と溶接部（裏波：back bead）とが容易に分別化できることも確認でき，圧電型探触子を用いた UT での探傷よりも，これらの分別化や再現性の向上が期待できる．よって，探傷現場での優位性が期待できる．

4.2.4 切断確認による SCC 深さの評価

これまでの実験結果の検証をするために，配管試験片（4N-1）に対し切断確認を行い，エッチング後に SCC 深さを測定した．その結果と PF-EMAT の振幅値データとの比較を行い，SCC の検出性評価を行った [41]．切断確認の手順は，放電加工による荒削り加工後にマイクロカッター切断機（カッター幅 0.3 mm）を用いて切断し，切断面を研磨（800 番，2000 番，布バフでの鏡面仕上げ）した後に，塩酸＋硝酸（混合比：塩酸 3-3.5，硝酸 1）で 30 秒から 5 分程度でエッチングをし，断面観察を行った．PF-EMAT で SCC からの反射信号が認められた位置（Fig. 4.20）を中心に切断（x=77，87，93，100，107，112，120 mm）を行い，合計 7 断面の確認を行った．切断領域の概略図を Fig. 4.21 に示す．上記切断位置の内，x=77，100，112，120 mm についての結果を Fig. 4.22 以降に示す．

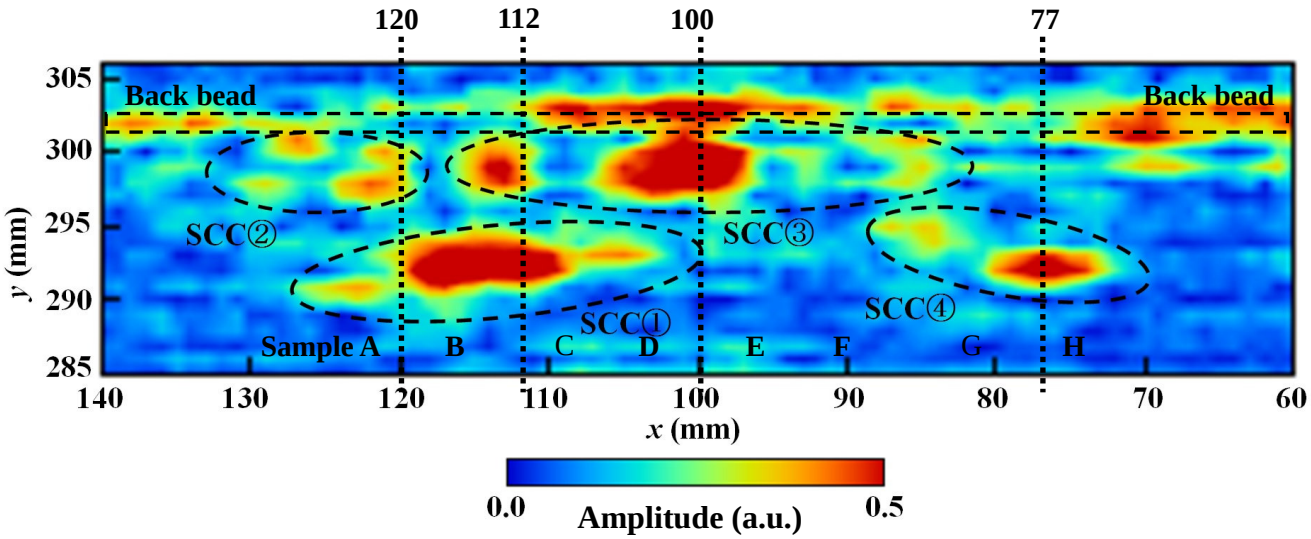


Fig. 4.20 Amplitude mapping using PF-EMAT[41].

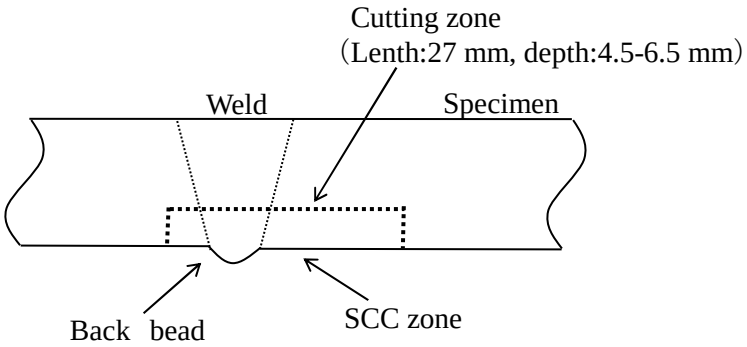


Fig. 4.21 Cutting range.

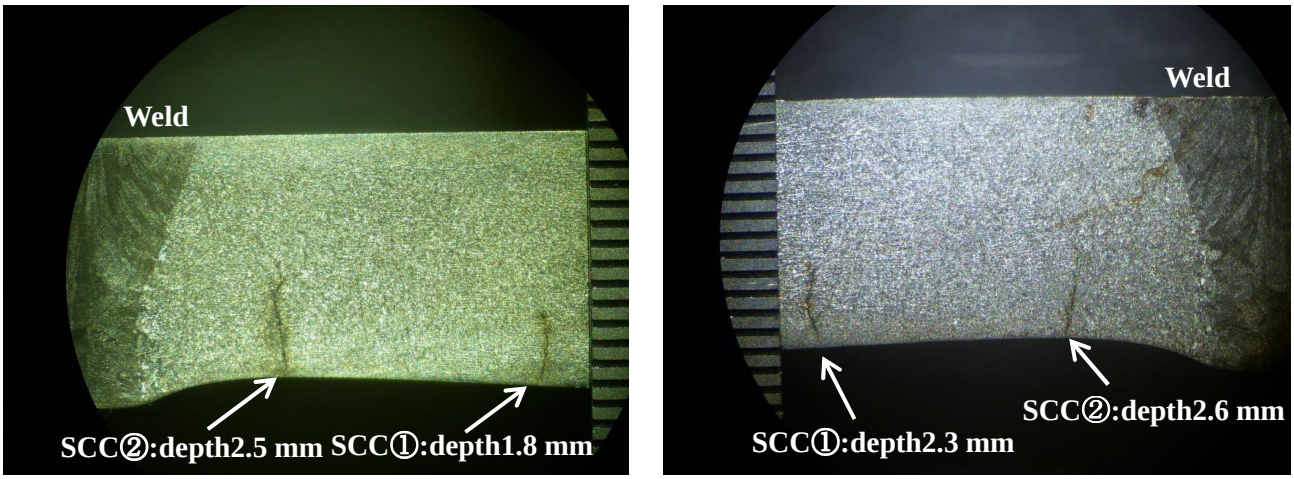
サンプル A-B 間:x=120 mm での切断断面写真を Fig. 4.22 に示す．また，SCC 深さの測定値を図中に示す．この結果より，PF-EMAT で検出した SCC①の深さは 2.3 mm で SCC②の深さは 2.6 mm であった．

サンプル B-C 間:x=112 mm での切断断面写真を Fig. 4.23 に示す．この結果より，PF-EMAT で検出した SCC①の深さは 1.6 mm で SCC③の深さは 2.4 mm であった．また，※部の SCC の受信振幅は当初は裏波と判断していたが, 切断後の確認写真から深さ 5.0 mm の SCC であることがわかった．前述した A-B 間の裏波位置では 0.288 V の振幅を認めたが，SCC は存在しなかった．一方，ここで

は 0.331V の振幅であった．よって，比較的高い振幅が認められた場合は SCC が存在しているものと判断するのが妥当と考えられる．

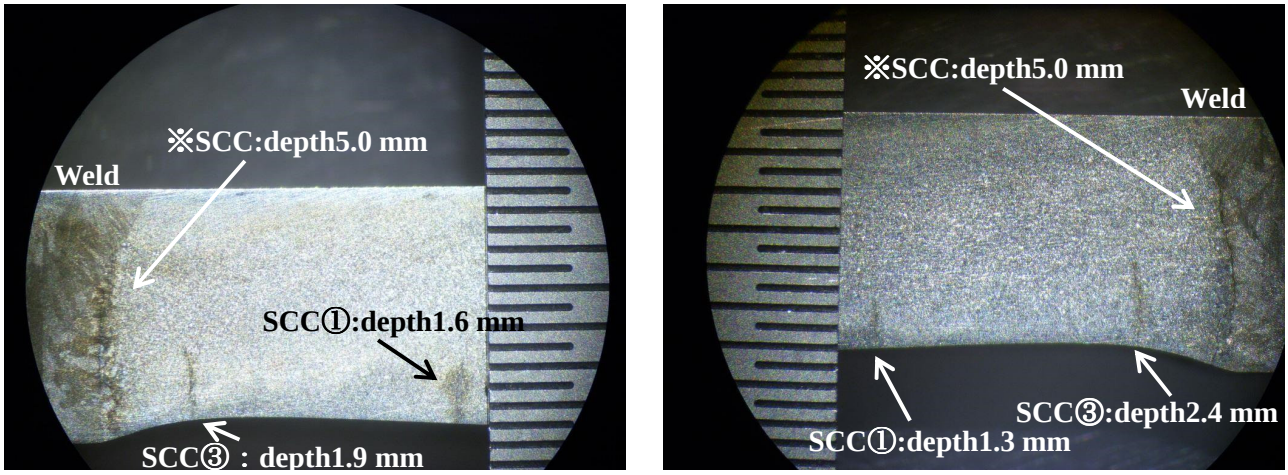
サンプル D-E 間:x=100 mm での切断断面写真を Fig. 4.24 に示す．この結果より，PF-EMAT で検出した SCC③の断面での深さは 4.9 mm であった．ここでの SCC③は 3 方向に分岐した特異な形態を示しており，この 3 方向の分岐の識別は振幅情報からでは困難である．また，裏波位置から 0.603 V の振幅値が受信されていたが，この断面観察の結果より SCC が存在しており，やはり振幅値が高い場合は SCC が存在しているものと判断するのが妥当と考えられる．

サンプル G-H 間:x=77 mm での切断断面写真を Fig. 4.25 に示す．ここで断面観察された SCC④の深さは 0.5 mm[41]程度であり，最も小さい SCC であった．Fig. 4.20 に示す PF-EMAT による結果を見ると，明確に受信振幅が得られている．このことから，深さは 0.5 mm 程度の SCC でも PF-EMAT で検出できることが分かった．なお，全ての切断断面写真中におけるスケールの最小目盛りは 0.5 mm である．



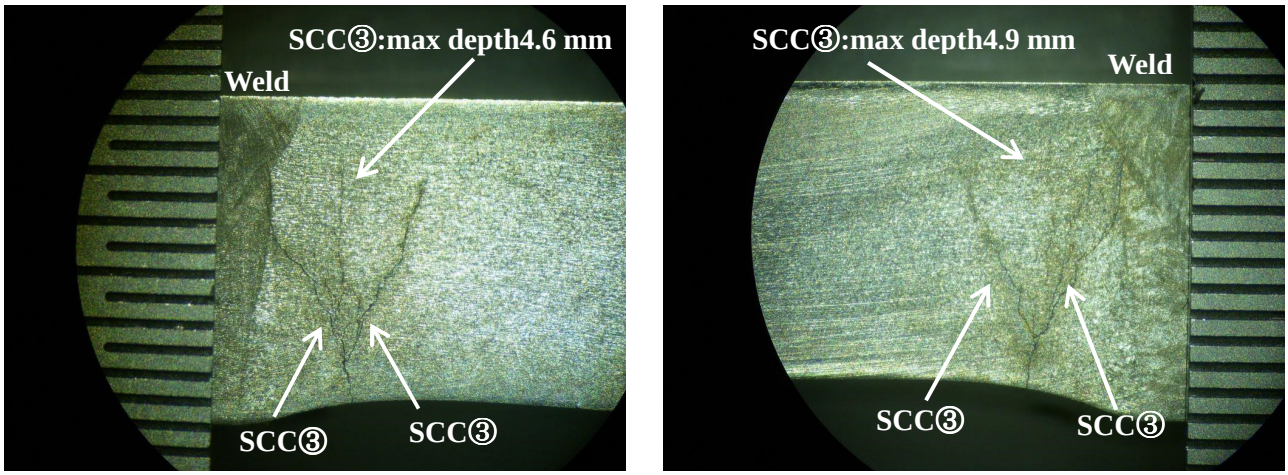
(a) Sample A　　(b) Sample B

Fig. 4.22 Cross sectional pictures[41].



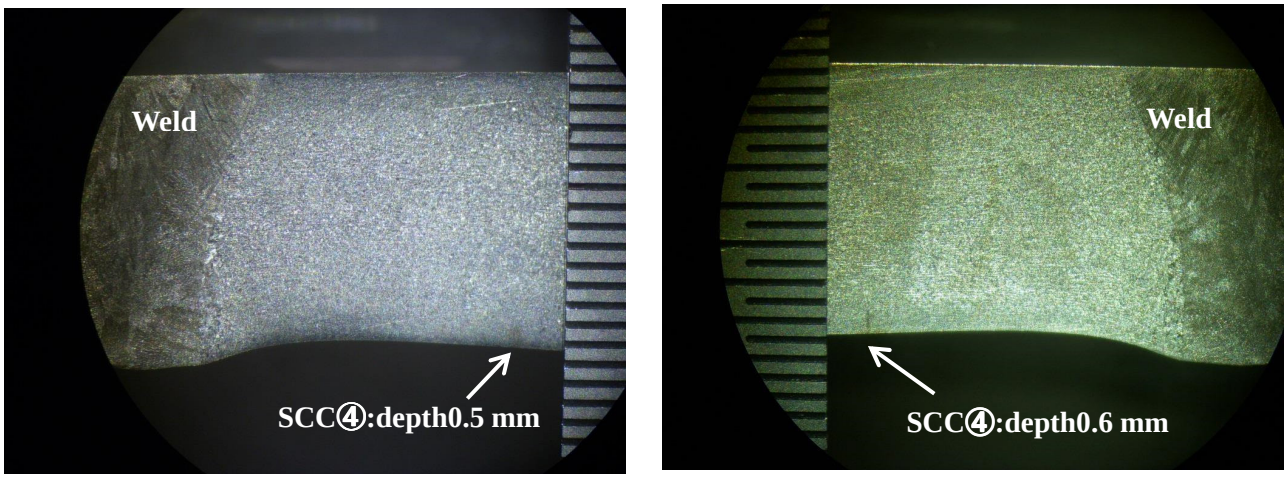
(a) Sample B　　(b) Sample C

Fig. 4.23 Cross sectional pictures[41].



(a) Sample D (b) Sample E

Fig. 4.24 Cross sectional pictures[41].



(a) Sample G (b) Sample H

Fig. 4.25 Cross sectional pictures[41].

以上の切断確認の結果より，PF-EMAT では導入された SCC を全て検出できることが確認でき，その最小深さは 0.5 mm[41]程度であった．よって，検出を目指していた溶接部と母材部の境界部に発生する SCC の検出は可能である．PF-EMAT では SCC の深さを振幅値から測定することは出来ないものの，溶接部に入り込んだ SCC や 3 方向に拡がる特異な形状の SCC も検出できている．また，※部のように裏波近傍に高い振幅が得られている場合，それは裏波から形状指示ではなく，SCC であることがこの結果から分かった．このように曲率を有した実機と同様の試験片でも，振幅値をマッピングすることによって SCC の検出が可能であることも分かった．

一方，圧電型探触子を用いた UT や PA でも PF-EMAT と同様に SCC の検出は全て可能であったが，PA で一部の SCC の深さを過小評価傾向であった．これは実際の SCC では正確に SCC 深さ評価を実施することが困難である一例となった．PF-EMAT でも振幅と SCC 深さに相関は認められず，振幅値だけで SCC 深さの測定をすることは困難である．

4.3 SCC の検出性能に対するまとめ

第 4 章では，以下の新たな知見を得ることができた．

（1）平板状試験片の結果から，PT でも検出できなかった微細な SCC の検出を PF-EMAT では高感度で検出できることが分かった．

（2）配管状試験片（4N-1）での切断確認結果から，PF-EMAT では最小 0.5 mm 程度の SCC が検出可能であることが分かった [41]．これは，原子力発電所で要求される SCC 深さ 1.5 mm[5]より，さらに小さい SCC の検出が可能であることを示唆している．

（3）当初，裏波からの反射信号と考えていた振幅についても，切断確認の結果から SCC であることが分かった．よって，裏波からの高い振幅を有する反射信号は SCC と判断できる．

（4）併行して実施した圧電型探触子を用いた UT と PA でも全ての SCC の検出は可能であった．しかし，SCC 深さの測定は困難で，実際は最大で深さ 5.8 mm[41]の SCC があったが，深さがほとんどない浅い SCC と評価していた．

以上の結果により，PF-EMAT は圧電型探触子を用いた UT や PA と，同等以上の SCC の検出性能を有していると判断できる．現状では，PF-EMAT では SCC 深さの評価はできないが，発生初期の微小な SCC や開口幅が非常に狭く，複雑な形態を有する特異な SCC に対しても検出は十分に可能である．よって，人工的に作製したスリットではなく，実際の SCC 検出においても PF-EMAT は検出能力が高い非破壊手法であるものと評価できる．

第 5 章 有限要素法によるスリット周辺の音場解析

ここまでの PF-EMAT を使った実験の中で，興味深い現象が観測されていた．圧電型探触子をパルス波で励起して用いる UT を行った場合，深さの異なる複数のスリットに対して，スリットからのエコー高さは概ねスリット深さに対して単調に変化する（Fig. 3.10）[9), 26)]．しかし，PF-EMAT では，受信振幅はスリット深さに対して単調に変化せず，ほぼ周期的に振動する挙動が認められた（Fig. 3.8）[9),32),41)]．本章では，PF-EMAT で励起された SV 波がスリットにて散乱する波動場をシミュレーションによって解析し，スリット深さと受信振幅の関係を解明する．

5.1 PF-EMAT でのスリット検出結果

Fig. 3.8 に示した板厚 20 mm のステンレス鋼材に対して 2.0 MHz で行ったスリットの検出結果を Fig. 5.1 に示す [32)]．d=0.80 mm のスリットからの振幅が最大であり，スリット深さに対して振動する挙動が認められる．

実験で使用してきた PF-EMAT（EMAT1）は 13-37°の入射角度（平均入射角度 25°）で超音波を入射するが，開口部と先端での散乱した超音波には位相差が生じる．それぞれの場所で散乱する際に位相が変化しないと仮定すると，$d=n\lambda/2\cos\theta$の条件を満たすときに，それぞれの散乱波は干渉によって強め合うことになり，スリット深さに対して周期的に振動することになる．ただし，n は正の整数である．2.0 MHz の PF-EMAT であれば振動周期は 0.85 mm になる．Fig. 5.1 を見ると，受信振幅はほぼこの周期で変化している．

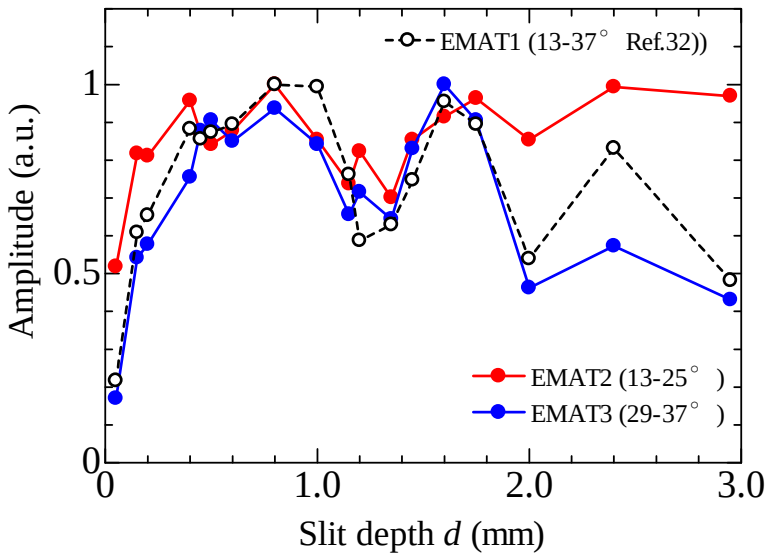


Fig. 5.1 Amplitude of received waves from slits measured by PF-EMATs with different incident angles[32)].

散乱波の干渉が振幅変化の主たる要因であるとすれば，入射角度を変えると先端と開口部からの二つの散乱波の位相が変化するため，振幅変化の周期も変化するはずである．そこで，Fig. 5.2 に示すように入射角度が 13-25°（平均入射角 19°）と 29-37°（平均入射角 33°）になるように線音源の数と位置を変えた二つの PF-EMAT を作製し（それぞれ EMAT2，EMAT3 と呼ぶ），スリットからの振幅値を測定した．なお，両者ともに周波数は 2.0 MHz である．これらの結果を Fig. 5.1 に重ね

て示す．EMAT2 と EMAT3 では，入射角が変化するため振幅の振動周期がそれぞれ 0.81 mm，0.92 mm になるはずである．しかし，Fig. 5.1 からは振動周期の変化を明確にとらえることができなかった．これは予想される振動周期の変化が小さく，測定誤差の中に包含されていることが考えられるが，その一方で，スリット先端と開口部からの散乱波の干渉以外の要因が影響していることも推測される．

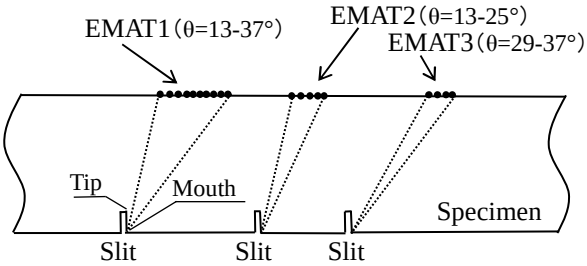


Fig. 5.2 Schematic of PF-EMATs with different incident angles[32].

5.2 解析モデルの妥当性評価

受信振幅がスリット深さに対して振動する要因究明を目的に有限要素法による数値解析を行った．解析には COMSOL Multiphysics を用い，計算モデルは 2 次元モデルとした．最初にメッシュサイズの検証のために，SV 波の指向性のシミュレーションを行った．モデルの材質は実験で用いた SUS304 鋼（ヤング率 197 GPa，ポアソン比 0.3，密度 8030 kg/m^3）とし，計算領域の寸法は縦 110 mm×横 150 mm とした．また，メッシュの最大寸法は 0.15 mm とした．これは 2.0 MHz の SV 波の波長のおよそ 1/10 である．この寸法の妥当性を確認するため，PF-EMAT が作り出す単一線音源から励起される SV 波の指向性を解析した．

試験体表面の一点に点音源を設定し，コイル直下のモデル表面に対して水平方向の点荷重を設定した．その点に 5 サイクルのバースト波形の荷重を表面に対して水平方向に印加した時の，音源から 100 mm の場所での SV 波の振幅（θ 方向の変位 u_θ）を Fig. 5.3 に示す．

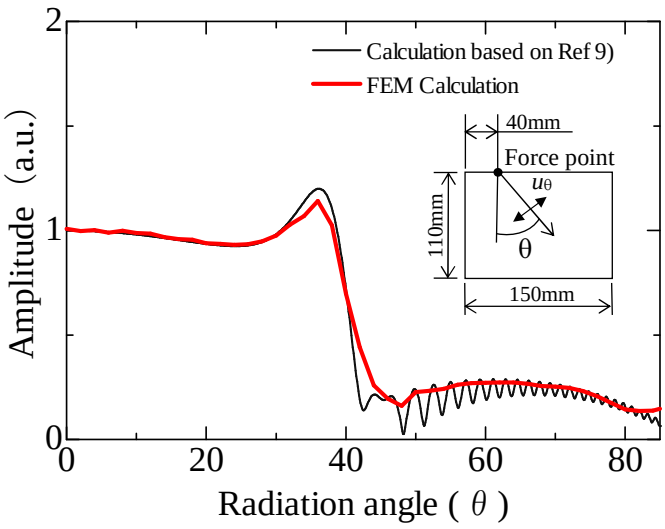


Fig. 5.3 Directivity of SV wave amplitude, u_θ, generated from a line source calculated for stainless steel [9].

このような線音源から放射される SV 波の振幅には式（1），（2）に示す解析解[27]があるため，ステンレス鋼材に対して計算した結果[9]も併せて示す. 両者は 0-40°の範囲に一様な強度の SV 波を放射し，35°付近で最大値となる指向性を示している．このことから上記の計算条件で SV 波の伝搬を再現できるとした.

5.3 PF-EMAT による超音波の伝搬状況確認

材料中の伝搬状況をシミュレーションで可視化した．PF-EMAT が作り出す音源を Fig. 5.4 に示すようにモデル化し，開発した PF-EMAT の形状を再現した荷重点を材料表面に設置することで，SV 波を発生させた．ここで与える荷重はサイクル数 12 回，振幅 5 N，周波数 2.0 MHz のバーストである．計算の時間ステップは 5×10^{-9} (s)とした．なお，2 次元モデルの水平方向を x 方向とし，垂直方向を z 方向とした.

焦点位置は Fig. 5.4 に示すように，スリットの手前（超音波発信側）の開口部に設定した．ここで超音波の発振直後（1.65 μs）の変位分布（x 方向成分）を Fig. 5.5(a)に，スリットに到達した時（8.3 μs）の変位分布を Fig. 5.5(b)に示す．この結果により，設計通りにスリットの方向に鋭い指向性をもった超音波が伝搬していることが分かった．また，Fig. 5.5(c)と(d)に各音源の銅線の数を 1 本にした場合の計算結果も示す．PF-EMAT に用いるコイルの銅線の数を増加させたことによって，より強い超音波が伝搬していることがシミュレーションによっても確認できた.

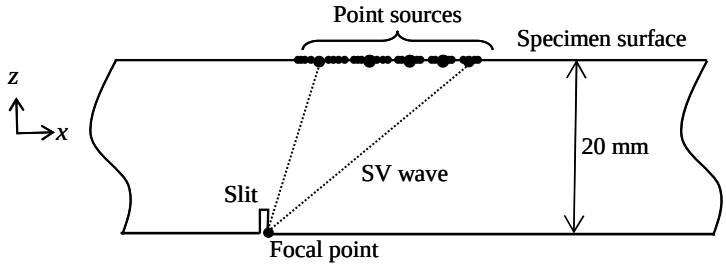


Fig. 5.4 FEM simulation model[32].

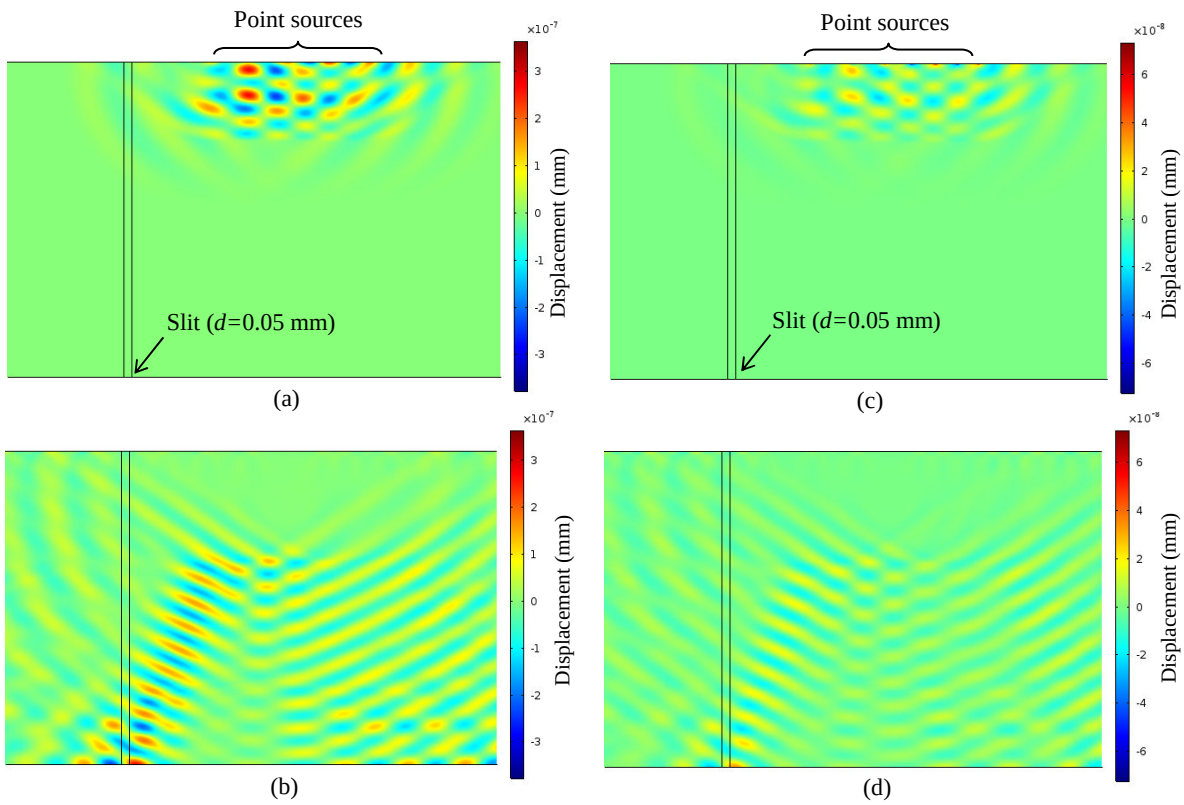


Fig. 5.5 Simulation results of the ultrasonic propagation; distributions of the *x* component of displacement at (a) and (c) immediately after exciting waves (1.65 μs) and (b) and (d) just when the SV-wave arrives at the slit mouth (8.3 μs) . (a) and (b) are for PF-EMAT with multiple wires and (c) and (d) are for PF-EMAT with single wire.

5.4 スリットからの受信振幅値の計算結果

PF-EMAT の実験で観測された振幅の振動現象の原因を調べるためのシミュレーションを行う．そのために，実験と同じ板厚 20 mm で長さは 200.5 mm の 2 次元モデルを作成した．モデルの中央底面にスリットを設け，深さを変えながら 18 個（*d*=0.05 mm-2.95 mm，*w*=0.5 mm）に対して解析を行った．スリットの形状は一般的な溝状スリット（スリット 1）と，実際の SCC を模擬して先端を尖らせたスリット（スリット 2）とした．それぞれ底面での幅は 0.5 mm と 0.05 mm であり，これらのスリットの模式図を Fig. 5.6 に示す．モデルの境界条件は，両端面に低反射境界を仮定し，4 つの角部は固定拘束とし，スリットを含めて上下の面は自由境界とした．音源の周波数は 2.0 MHz とし，コイル直下のモデル表面に対して水平方向の点荷重を設定した．

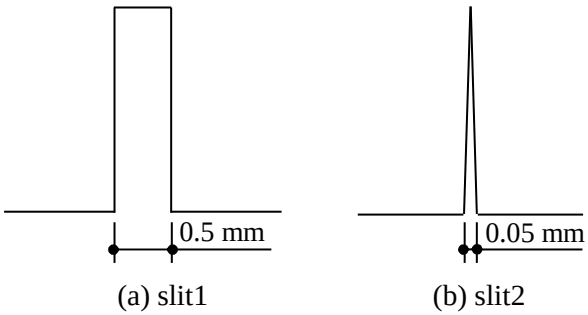
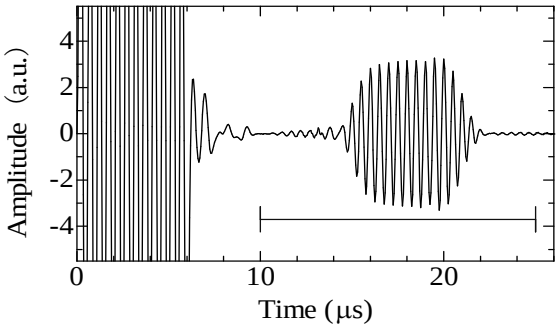
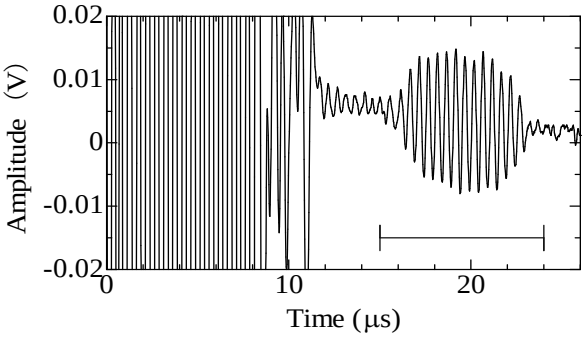


Fig. 5.6 Slit types.

PF-EMAT は変位の水平成分に感度があるため，スリットからの反射波が各コイル位置（音源位置）に作り出す変位の水平（x）方向成分を抽出する．送信時には隣接する音源から位相が半波長だけずれた SV 波が励起されるが，受信時も隣接する音源位置で SV 波の位相が半波長だけずれたときに受信信号が強め合う．そこで各音源位置での変位を，隣接する音源に対して一つおきに反転させた後に全てを足し合わせることで， PF-EMAT での受信波形に相当する変位の時間変化が得られる．この波形中に現れる反射波を含むようにゲートを設定して，離散フーリエ変換にて振幅値を算出した．Fig. 5.7(a)に，深さ d=0.40 mm のスリットに対して得られた変位の時間変化を，Fig. 5.7(b)には同じ深さのスリットに対して実験で得られた受信波形を示す．この比較から，計算で得られた受信波形が実験で得られたものと同程度のバースト幅を有しており，受信される時間もほぼ同じである．このことから，シミュレーションによって実験を再現できていると考えられる．



(a)



(b)

Fig. 5.7 Waveforms of received signals from (a) FEM calculation and (b) experiment. Slit depth is 0.40 mm. The lines denote the gate positions[32].

Fig. 5.8(a)と(c)に，スリット 1 と 2 のフーリエ変換によって得られた受信振幅値と実験結果を比較して示す．スリット深さに対して両者は概ね同一周期の振動挙動を示しており，2 次元の音場解析においても実験と同様の結果が得られた．

PF-EMAT では反射信号とスリット深さが単調に変化しない要因の追求を目的として，得られた結果からスリット周辺での振動とどのような関係があるかを調べた．各スリット深さにおいてスリットの開口部と先端部の x 方向変位の最大値をプロットした結果をスリット 1 では Fig. 5.8(b)に，スリット 2 では Fig. 5.8(d)に示す．Fig. 5.8(b)のスリット 1 では，先端部よりも開口部の方で振動変位が大きく，Fig. 5.8(a)の受信振幅が低下しているスリット深さに対して開口部の変位が上昇し，逆に受信振幅が大きいときは変位が低下する挙動が認められた．スリット 2 でも Fig. 5.8(c)に示すように若干の相違があるものの同一傾向である．この比較から特定のスリット深さにおいて，SV 波

の照射によってスリット周辺で局所的な共振が発生し，入射した超音波エネルギーの一部がこれに費やされたために受信振幅が減少したと推測される．

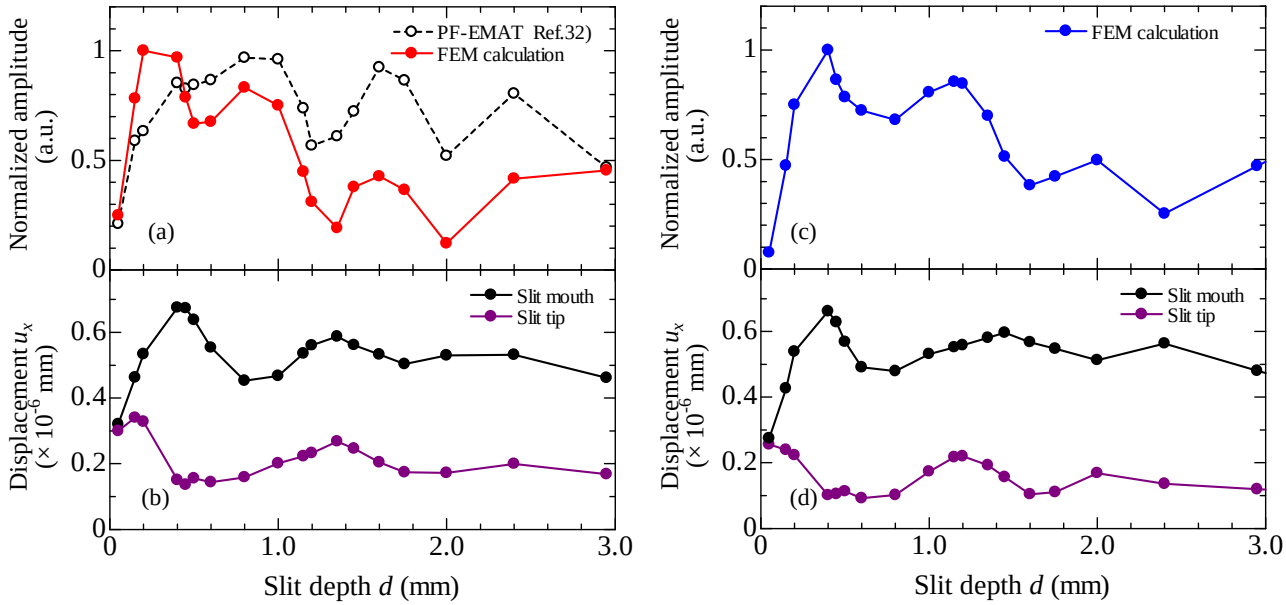


Fig. 5.8 Experimental and simulation results of (a)(c) the amplitude of the received signals and (b)(d) displacement at the slit mouth and tip. (a) and (b) are from slit 1, (c) and (d) are from slit 2. Echo amplitudes measured by the PF-EMAT in Ref. 32) are plotted for comparison.

5.5 スリット周辺の局所振動の解析

ここでは，スリット周辺に発生する局所的な振動について調べた．スリット 1 を導入した長方形の 2 次元モデルに対して，その自由振動の共振周波数と変位分布を計算する．特定の周波数（この場合は 2.0 MHz）の超音波を照射したとき，特定の深さのスリット周辺に局所的な振動が発生するのであれば，2 次元モデル全体の大きさが変化したとしても，スリット周辺の局所的な振動は同じ周波数で発生するはずである．そこで，異なる大きさのモデルに対する共振周波数と変位分布から，スリットに起因する局所振動が存在するかどうか調べる．ここでは寸法が 20.5 mm×20 mm，22.5 mm×22 mm，24.5 mm×24 mm の 3 つの長方形モデルを考える．長方形の一辺の中心に矩形スリットを作成し，スリット部分も含めてモデルの周囲は自由境界として共振周波数を有限要素法で用いて計算する．メッシュサイズは先の計算と同様に最大で 0.15 mm とする．スリット深さは Fig. 5.8(a) において開口部の変位が大きく受信振幅が小さくなる，すなわち局所振動が発生していると考えられる d=0.50 mm と 1.35 mm，および開口部の変位が小さくなり受信振幅が大きくなる局所振動が顕著ではないと考えられる d=0.80 mm の 3 つとし，2.0 MHz 付近の共振周波数を計算した．

Fig. 5.9 に 20.5 mm×20 mm，d=0.50 mm のモデルに対して得られた代表的な共振周波数と変位分布を示す．2.0 MHz の近傍には複数の共振周波数が存在するが，その多くは Figs. 5.9(a)-5.9(d)に示すように，2 次元モデルの領域全体に渡って変形が生じている．ところが，いくつかの共振周波数では，Figs. 5.9(e)-5.9(f)に示すようにスリット近傍のみが顕著に振動する様子が確認された．そこで，スリット周りに振動が集中していている度合いを示す指標として，開口部先端の二乗変位 u_m^2 とモデル全体の二乗変位の平均値の比 $u_m^2/\langle u^2\rangle$を考える．Fig. 5.9 に書かれた $u_m^2/\langle u^2\rangle$からも分かるように，この値が大きいほど変形がスリット周辺に集中して生じていることになる．

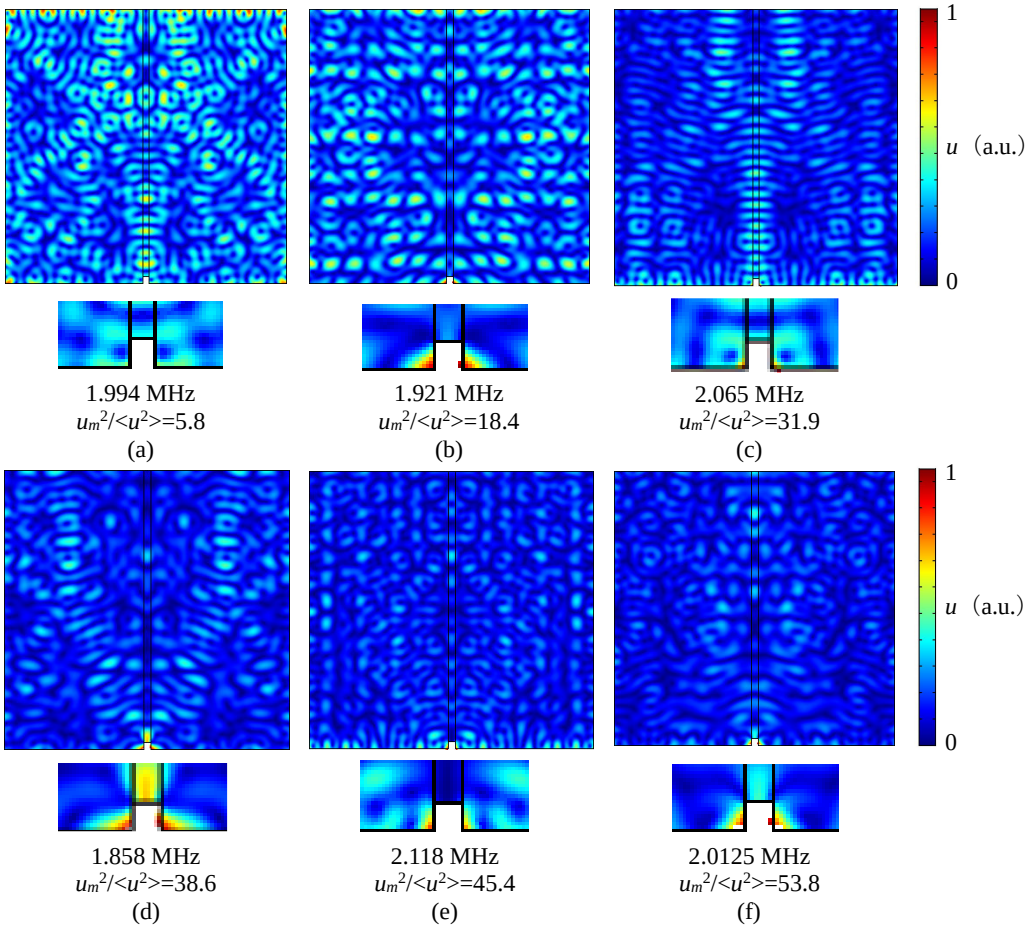


Fig. 5.9 Distributions of absolute displacement of the 20.5 mm × 20 mm model with the slit of *d*=0.50 mm at representative resonant frequencies. Total view (top) and enlarged view (bottom) around the slit are shown [32].

Fig. 5.10(a)に 20.5 mm×20 mm, *d*=0.50 mm のモデルに対する $u_m^2/\langle u^2\rangle$と共振周波数の関係を示す．いくつかの共振周波数で局所振動が発生していることが分かる．Fig. 5.9 から $u_m^2/\langle u^2\rangle$=40 程度を閾値として，それ以上で局所振動が発生していると考え，$u_m^2/\langle u^2\rangle$>40 となる共振周波数に注目して Figs. 5.10(b)-(d)にその帯域での共振周波数と $u_m^2/\langle u^2\rangle$の関係を示す．*d*=0.50 mm の場合では（Fig. 5.10(b)），2.0 MHz 付近において複数の局所振動が存在する．このうちいくつかの共振周波数はモデルの寸法を変えてもほぼ同じ周波数帯域に現れる．特に 2.0 MHz 付近のものを矢印で示す．これらの共振周波数はモデル寸法に依存せず，スリットの存在に起因するものであり，スリット周辺に局所振動が発生していることを示している．*d*=1.35 mm のモデルでも同様の傾向が確認できる．一方，*d*=0.80 mm のモデルでは，2.0 MHz 付近に開口部の変位が大きい共振周波数は存在するもの，上記の二つのスリット深さの場合に比べてその数が少ない．また，モデルの寸法による共振周波数の変化率が他のスリット深さに比べて大きく，これらの共振周波数がスリットの存在に起因する局所振動に起因するものであるとは言えない．なお，$u_m^2/\langle u^2\rangle$>30 となる共振周波数に注目して同様の解析を行ったところ，*d*=0.80 mm の場合に局所振動と思われる共振周波数が現れた．しかしながら，他のスリット深さでも新たに局所振動と思われる共振周波数が現れたため，閾値を変えたとしても *d*=0.50 mm，1.35 mm で局所振動が発生するという結果に変化はなかった．

このように，特定のスリット深さにおいて，スリット周辺に局所振動が生じることが明らかとな

った．このことから，PF-EMAT で観測された受信振幅の低下はスリット周りでの局所振動の励起によるものであると言える．

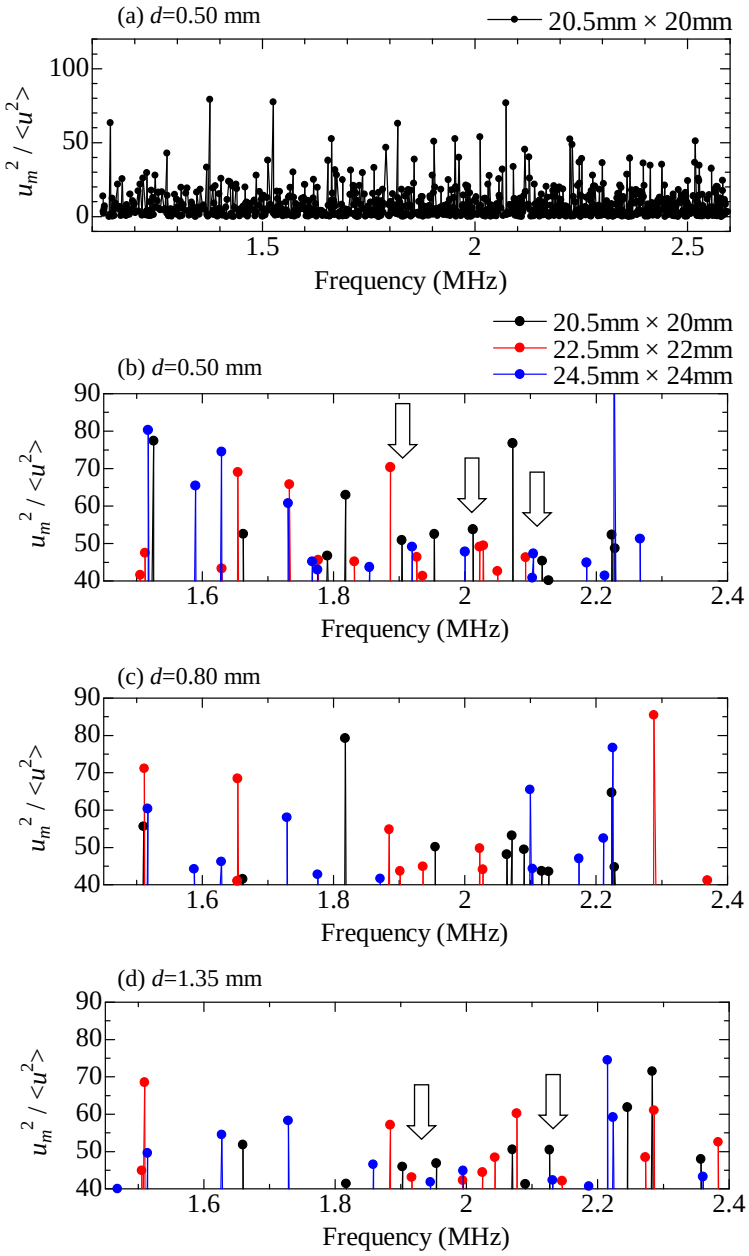


Fig. 5.10 Relationship between frequency and $u^2/<u^2>$ at (a),(b) d=0.50 mm, (c) d=0.80 mm, and (d) d=1.35 mm. Arrows indicate resonant frequencies that are insensitive to the size of the model [32] .

Fig. 5.8 において開口部の変位が大きくなり受信振幅が小さくなる d=0.50 mm，1.35 mm，2.00 mm のスリットについて，スリット周辺の変位分布を Fig. 5.11 に示す．SV 波がスリットに到達すると，これらのスリット深さでいずれも先端部付近が節となり，開口部が腹となる振動形態を示した．スリット深さが大きくなるにつれて，スリット側面での振動の節の数が 0，1，2 と増えている（先端部を除く）．開口部の変位が最大になるスリット深さの間隔は 0.65-0.85 mm であり，これは 2.0 MHz のレイリー波 [42]の波長（~1.4 mm）の半分に概ね一致する．よって，局所振動はスリットの側面におけるレイリー波の重ね合わせによる共振とみなすことができる．スリットや割れに対して短波長のレイリー波を入射すると，反射波と透過波の振幅がスリットや割れの深さの変化に対して振動す

ることが報告されている[43), 44)]．その中で割れの側面においてレイリー波による共振が生じることが示されている[44)]．SV 波を開口部に斜め入射した場合も，スリット周辺の境界部での反射・散乱の際に入射エネルギーの一部がレイリー波に変換され，同様の現象が生じるものと考えられる．

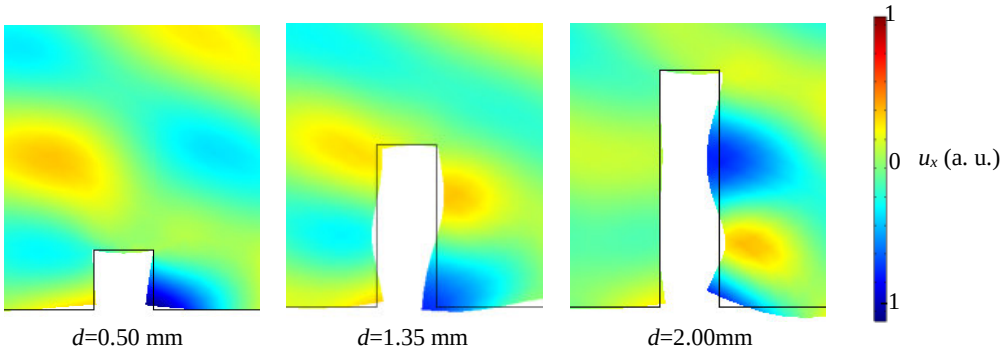


Fig. 5.11 Representative displacement distributions around slits at which the SV waves at 2.0MHz are scattered around the slits. Deformations of models are magnified. Color indicates u_x[32)].

局所振動に起因すると考えられる振幅変化は，圧電型探触子を用いた UT でも観察された（Fig. 3.10）．しかし，PF-EMAT と比較すると振幅の変動幅が小さい．これはパルスで駆動する圧電型探触子では 2.0 MHz の成分だけが局所振動に貢献し，他の周波数成分はスリット深さに依存して散乱強度が変化したと考えられる．一方，PF-EMAT ではバースト波で駆動しているため，2.0 MHz の成分が引き起こす局所振動の影響が顕著に表れたものと考えられる．

5.6 スリット周辺の音場解析のまとめ

第 5 章では，2 次元数値シミュレーションによって以下の新たな知見を得ることができた．

(1) PF-EMAT で励起された SV 波の材料中の伝搬状況を確認した．その結果，設計通りに超音波が集束してスリット開口部に到達していることが可視化できた[32)]．

(2) 開発した PF-EMAT での受信振幅値について，実験値と計算値は同一傾向であり，実験で観測された振幅値の挙動の妥当性が確認できた[32)]．

(3) 入射した SV 波のエネルギーの一部がスリット面に発生するレイリー波の共振に費やされることで，受信振幅が周期的に変動する主たる原因であることが導かれた[32)]．

第 6 章 結言

近年，各プラントの保全活動の一環として，高経年化対策が脚光を浴びている．この対策の中でも，特に原子力発電所での配管や，圧力容器等の金属材料に発生する SCC の検出において適用する圧電型探触子を用いた UT の信頼性の向上が期待されている．しかし，超音波の発信源を直接接触させる現状の手法では，試験員の熟練の程度，接触媒質の量，表面状態等の要因で試験結果が左右されやすく，SCC の検出を画一的に評価することは困難である場合が生じていた．

これらのことから，上記の影響を受けにくい，非接触での SCC の検出に係る超音波探傷方法の研究を計画し実行してきた．その結果，本研究において次の新たな知見が得られた．

記

（1）開発した PF-EMAT により，超音波の伝搬特性が低下するステンレス鋼材に対しても，深さ 0.05 mm のスリットを明確に検出できることが分かった [9]．

（2）探傷現場での適用を考慮した種々の想定事項に対しても，開発した PF-EMAT における探傷現場での影響は従来の UT より小さく，かつ，高い再現性を有しており，実際の探傷現場でも影響を与えないことが分かった [9]．

（3）PF-EMAT の結果から，PT で検出された SCC を全て検出できることが確認でき，切断確認結果から，PF-EMAT では最小 0.5 mm の SCC が検出可能であった [41]．これにより，原子力発電所で要求される SCC 深さ 1.5 mm[5]より小さい SCC の検出が可能である．

（4）PF-EMAT で励起された SV 波の材料中の伝搬状況をシミュレーションで確認した．その結果，設計通りに超音波がスリットに到達していることが可視化できた．また，受信振幅値を数値解析すると，実験値と計算値は同一傾向であり，実験で観測された振幅値の挙動の妥当性が分かった [32]．

（5）数値シミュレーションの結果から，スリットでの局所振動に超音波エネルギーの一部が使われるため，スリット深さとともに受信振幅が振動することが分かった [32]．

以上のことより，PF-EMAT でのスリットや SCC の検出性能が評価された．PF-EMAT はスリットや SCC の検出深さ値が小さく，圧電型探触子を用いた UT と同等以上の性能を有しており，探傷現場で予想される種々の影響についても非接触で接触媒質を用いないため，PF-EMAT の優位性が期待できる．また，非接触である利点を活かし，高温環境中での適用や状態監視での適用も可能となり，探傷現場での適用範囲が大きく広がる．よって，PF-EMAT は SCC の検出能力や探傷現場での適用性が高い手法となることが期待できる．

本研究結果を踏まえて，SCC 検出のための新しいツールとして，今後 PF-EMAT を探傷現場に提案したく考えている．

以　上

謝辞

本論文をまとめるのにあたり，大阪大学基礎工学研究科　平尾雅彦元教授にご指導とご教示を賜りました．ここに心から厚く感謝致します．本論文の作成と審査に際し，大阪大学基礎工学研究科小林秀敏教授，尾方成信教授，田中正夫教授，荻博次准教授，中村暢伴助教の各先生方から有益なご指導とご教示を賜りましたことを，ここに謹んで感謝申し上げます．共同で研究を行い，常に一緒に優秀な PF-EMAT を作製してくれ，有意義な議論をしてくれた滝下峰史君や坪井誠也君，研究室の学生諸君に感謝を申し上げます.

本研究は，著者が過去の探傷現場で圧電型探触子を用いた UT の実務を数多く経験してきましたが，必ずしも SCC の検出性が高い方法とは言えないものと考えてきました．そのため，今後の探傷現場での SCC の検出性向上の一助とするために，電磁超音波法の研究開発を行い，その内容をまとめたものであります．本研究をまとめるのにあたり，一般財団法人発電設備技術検査協会西日本支部の中川寛之元支部長，SCC 試験片の貸与や PA のデータを提供して頂きました同溶接・非破壊検査技術センターの古川敬所長をはじめとする役職員の皆様方, SCC 試験片を貸与して頂いた一般社団法人日本非破壊検査協会の関係各位に厚く感謝の意を表します.

また，長年にわたりご支援を頂きました，一般社団法人日本非破壊検査協会　鬼丸昌浩殿，非破壊検査株式会社　江淵高弘殿，原子力規制委員会原子力規制庁　渋谷徹殿の皆様方には厚く感謝の意を表します.

最後に，学位取得にあたり，陰ながら支えてくれた，家族，友人の皆様に心から感謝の意を表します.

参考文献

1) 電気事業連合会HP: http://www.fepc.or.jp/nuclear/state/setsubi/index.html, (2017.3.4)
2) 矢川元基: 原子力プラントのエイジングと寿命評価, 原安協プライマー, No7, pp.19-20, (2008)
3) 溶接学会編: 溶接・接合技術特論,産報出版, pp.176-178, p.202, (2003)
4) 日本電気協会編: 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程, pp.5-20, (JEAC4207-2016)
5) 日本機械学会: 発電用原子力設備規格 維持規格, (JSME S NA1-2008)
6) 出町和之: 原子力保全工学, オーム社, pp.102-106, pp.113-114, pp.182-183, (2010)
7) 日本非破壊検査協会編: 新非破壊検査便覧, pp.10-11, (1992)
8) 水谷義弘: 図解入門よくわかる最新非破壊検査の基本と仕組み, 秀和システム, pp.66-76, pp.98-112, p.209, (2010)
9) 芦田一弘, 滝下峰史, 中村暢伴, 荻博次, 平尾雅彦: 点集束型電磁超音波センサのSUS304鋼におけるスリット検出性能の評価, 非破壊検査, 65(2), pp.79-84, (2016)
10) 落合誠, 三浦崇広, 山本智: レーザー超音波探傷技術の開発と原子炉内保全への適用, 東芝レビュー, 61(1), pp.44-47, (2006)
11) H. Nishino, T. Asano, Y. Taniguchi, K. Yoshida, H. Ogawa, M. Takahashi and Y. Ogura: Precise Measurement of Pipe Wall Thickness in Noncontact Manner Using a Circumferential Lamb Wave Generated and Detected by a Pair of Air-Coupled Transducers, Japanese Journal of Applied Physics, 50(7S), pp. 07HC10, (2011)
12) R. B. Thompson: A Model for the Electromagnetic Generation of Ultrasonic Guided Waves in Ferromagnetic Metal Polycrystals, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, SU-25, pp.7-15, (1978)
13) G. A. Alers and D. T. MacLauchlan: High Frequency, Angle Beam EMATs for Weld Inspection, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, ed. D. O. Thompson and D. E. Chimenti (Plenum, New York, 1982), Vol. 2A, pp.271-281, (1983)
14) W. B. Maxfield and C. M. Fortunko: The Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers (EMATs), Materials Evaluation, 41(12), pp.1399-1408, (1983)
15) K. Kawashima: Electromagnetic Acoustic Wave Source and Measurement and Calculation of Vertical and Horizontal Displacements of Surface Waves, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, SU-32, pp.514-522, (1985)
16) H. Ogi, M. Hirao and T. Ohtani: Line-Focusing of Ultrasonic SV Wave by Electromagnetic Acoustic Transducer, Journal of Acoustical Society of America, 103(5), pp.2411-2415, (1998)
17) 日刊工業新聞社編: ステンレス鋼便覧, p.110, (昭和 54 年 1 月 30 日)
18) 日本非破壊検査協会編: 渦流探傷試験Ⅲ, pp.28-29, (2003)
19) 日本非破壊検査協会編: 超音波探傷試験Ⅲ, p.23, pp.69-71, p.122, p.204, (2001)
20) M. Hirao and H. Ogi: Electromagnetic Acoustic Transducers - Noncontacting Ultarasonic Measurements using EMATs, pp.4-9, pp.16-38, pp. 53-56, (Springer, Japan, 2017)
21) Wegel,R.L and Walther,H: Internal dissipation in solids for small cyclic strains.Journal of Applied Physics, 6, pp.141-157, (1935)
22) 日本非破壊検査協会: オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の方向による音速と減衰の比較, NDI 資料 21457, (1994)

23) 発電設備技術検査協会: ステンレス鋼溶接金属を透過した UT（検出）確認試験 研究の成果, 技術レビューVol7, (2011)
24) 米山弘志: ステンレス鋼溶接部の超音波探傷試験日本非破壊検査協会, 非破壊検査, 第 53 巻 11 号, (2004)
25) H. Ogi, M. Hirao and T. Ohtani: Line-Focusing Electromagnetic Acoustic Transducer for the Detection of Slit Defects, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 46(2), pp.341-346, (1999)
26) 日本非破壊検査協会編: 超音波探傷試験Ⅱ, p.7, p.38, pp12-16, pp.80-84, pp.139-146, p.159, p.193, (2001)
27) G. F. Miller and H. Pursey: The Field and Radiation Impedance of Mechanical Radiators on the Free Surface of a Semi-Infinite Isotropic Solid, Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 223(1155), pp.521-541, (1954)
28) 土屋由美子: 結晶粒微細化オーステナイト系ステンレス鋼の接合, 溶接学会誌, 第81巻第7号, (2012)
29) 澤田正美,喜多勇人,渋谷将行,藤澤一芳: 精密加工用オーステナイト系ステンレス鋼板の開発, 新日鉄住金技報第396 号, (2013)
30) 伊藤清文: アルミニウム系スーパーメタルの研究開発, JRCM NEWS, №190, (2002.8.1)
31) 小堀修身,岩清水幸夫: 超音波の音速に及ぼす応力と音速の影響, 日本機械学会論文集, 54 巻第 498 号, (1988)
32) 芦田一弘, 滝下峰史, 坪井誠也, 中村暢伴, 荻博次, 平尾雅彦: 点焦点型電磁超音波センサによる探傷とスリット近傍の局所振動, 非破壊検査, 66(9), pp.437-442, (2017)
33) 芦田一弘, 滝下峰史, 中村暢伴, 荻博次, 平尾雅彦: 集束型電磁超音波センサによるステンレス材料のスリット検出性,日本非破壊検査協会, 平成 26 年度秋季講演大会講演概要集, pp.5-6, (2014)
34) 滝下峰史, 芦田一弘, 中村暢伴, 荻博次, 平尾雅彦： SV波点集束型電磁超音波センサの駆動周波数が欠陥検出のダイナミックレンジに及ぼす影響,日本機械学会, 2015年度年次大会, J0420206, (2015)
35) 財団法人発電設備技術検査協会: 超音波探傷試験による再循環系配管サイジング精度向上に関する確性試験報告書(概要版) , pp.45, (平成15年6月4日)
36) T. Takishita, K. Ashida, N. Nakamura, H. Ogi and M. Hirao: Development of Shear-Vertical Wave Point-Focusing Electromagnetic Acoustic Transducer, Japanese Journal of Applied Physics, 54, pp.07HC04, (2015)
37) 芦田一弘, 滝下峰史, 中村暢伴, 荻博次, 平尾雅彦: 点集束型電磁超音波センサによるステンレス溶接試験片の探傷, 日本非破壊検査協会, 平成 27 年度秋季講演大会講演概要集, pp.23-24, (2015)
38) 日本規格協会編: JISハンドブック, 43, 非破壊検査, p.767, (2012)
39) 長秀雄, 三原毅, 古川敬: 疑似 SCC 探傷研究委員会活動報告 1, 日本非破壊検査協会, 平成 26 年度秋季講演大会講演概要集, pp.65-66, (2014)
40) 旧原子力安全保安院発行資料: 超音波探傷検査の精度等に関する知見の整理, (平成15年2月18日)

41) N. Nakamura, K. Ashida, T. Takishita, H. Ogi, and M. Hirao: Inspection of stress corrosion cracking in welded stainless steel pipe using point-focusing electromagnetic-acoustic transducer, NDT & E Int. 83, pp.88-93, (2016)
42) 平尾雅彦: 音と波の力学, 岩波書店, pp.114-118, (2013)
43) D. A. Mendelsohn, J. D. Achenbach and L. M. Keer: Scattering of elastic waves by a surface-breaking crack, Wave Motion, 2, pp.277-292, (1980)
44) I. A. Viktorov: Rayleigh and Lamb Waves, Plenum Press (New York), p. 61, (1967)

研究業績一覧

学術論文

（1）T. Takishita, K. Ashida, N. Nakamura, H. Ogi and M. Hirao: Development of Shear-Vertical Wave Point-Focusing Electromagnetic Acoustic Transducer, Japanese Journal of Applied Physics, 54, pp.07HC04, (2015)

（2）芦田一弘, 滝下峰史, 中村暢伴, 荻博次, 平尾雅彦: 点集束型電磁超音波センサのSUS304鋼におけるスリット検出性能の評価, 非破壊検査, 65(2), pp.79-84 , (2016)

（3）N. Nakamura, K. Ashida, T. Takishita, H. Ogi, and M. Hirao: Inspection of stress corrosion cracking in welded stainless steel pipe using point-focusing electromagnetic-acoustic transducer, NDT & E Int. 83, pp.88-93, (2016)

（4）芦田一弘, 滝下峰史, 坪井誠也, 中村暢伴, 荻博次, 平尾雅彦: 点焦点型電磁超音波センサによる探傷とスリット近傍の局所振動, 非破壊検査, 66(9), pp.437-442 , (2017)

解説記事

（1）滝下峰史, 芦田一弘, 中村暢伴, 荻博次,平尾雅彦 ”微小な SCC の検出を目的とした新たな電磁超音波センサの開発=SV 波点焦点型電磁超音波センサ=”, 超音波テクノ, 第 28 巻第 2 号, 39-43 (2016).

国内学会における発表

（1）芦田一弘, 滝下峰史, 中村暢伴, 荻博次, 平尾雅彦 ”集束型電磁超音波センサによるステンレス材料のスリット検出性”
平成 26 年度 日本非破壊検査協会　秋季講演大会
（平成 26 年 10 月 28 日～29 日，名古屋国際会議場）

（2）滝下峰史, 芦田一弘, 中村暢伴, 荻博次, 平尾 雅彦 ”Development of SV-wave point-focusing electromagnetic acoustic transducer”
第 35 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
（平成 26 年 12 月 3 日～5 日，明治大学 駿河台アカデミーコモン）

（3） 滝下峰史, 芦田一弘, 中村暢伴, 荻博次, 平尾 雅彦 ”SV 波点集束型電磁超音波センサの駆動周波数が欠陥検出のダイナミックレンジに及ぼす影響”
2015 年度日本機械学会年次大会（平成 27 年 9 月 13 日～16 日，北海道大学 工学部）

（4）芦田一弘, 滝下峰史, 中村暢伴, 荻博次, 平尾雅彦 ”点集束型電磁超音波センサによるステンレス溶接試験片の探傷”
平成 27 年度 日本非破壊検査協会　秋季講演大会
（平成 27 年 10 月 15 日～16 日，北海道立道民活動センター）

（5）滝下峰史, 芦田一弘, 中村暢伴, 荻博次, 平尾 雅彦 ”Detection of cracking near welding of SUS316 pipe by shear-vertical-wave point-focusing-electromagnetic acoustic transducer”
第 36 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
（平成 27 年 11 月 5 日～7 日，つくば国際会議場（エポカルつくば））

（6） 坪井誠也, 芦田一弘, 滝下峰史, 中村暢伴, 荻博次, 平尾雅彦 ”半円形状コイルを用いた点集束型電磁超音波センサのスリット欠陥検出能の評価”
2016 年度日本機械学会年次大会（平成 28 年 9 月 11 日～14 日，九州大学伊都キャンパス）