



電磁超音波探触子を用いた定点監視技術に関する研究

小坂, 大吾

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2012-03-25

(Date of Publication)

2012-10-09

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5487

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005487>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

電磁超音波探触子を用いた
定点監視技術に関する研究

平成 24 年 1 月

神戸大学大学院工学研究科

小坂 大吾

目次

| | | |
|------------|-------------------------------|-----------|
| 第1章 | 緒論 | 1 |
| 1.1. | 研究の背景 | 1 |
| 1.2. | 研究の目的 | 4 |
| 1.2.1. | 配管減肉管理の現状 | 4 |
| 1.2.2. | 提案する減肉管理手法..... | 11 |
| 1.3. | 研究の概要と構成 | 12 |
| 第2章 | 電磁超音波による厚さ測定法 | 13 |
| 2.1. | 緒言 | 13 |
| 2.2. | 超音波探触子..... | 14 |
| 2.2.1. | 従来の超音波探触子 | 14 |
| 2.2.2. | 電磁超音波探触子 | 17 |
| 2.3. | 超音波を用いた厚さ測定法..... | 23 |
| 2.3.1. | パルスエコー法..... | 23 |
| 2.3.2. | 共振法 | 26 |
| 2.4. | 結言 | 29 |
| 第3章 | パルスエコー法を用いた減肉の評価 | 31 |
| 3.1. | 緒言 | 31 |
| 3.2. | 平板模擬減肉試験体による予備実験 | 32 |
| 3.2.1. | 試験体 | 32 |
| 3.2.2. | 測定方法..... | 33 |
| 3.2.3. | 測定結果..... | 36 |
| 3.3. | 配管模擬減肉試験体への適用 | 57 |
| 3.3.1. | 試験体 | 57 |
| 3.3.2. | 測定方法..... | 59 |
| 3.3.3. | 測定結果..... | 61 |
| 3.4. | 結言 | 85 |

| | | |
|-------------|-----------------------------------|------------|
| 第4章 | 共振法を用いた模擬 FAC 減肉評価 | 87 |
| 4.1. | 緒言..... | 87 |
| 4.2. | 共振法における厚さ測定分解能の確認..... | 88 |
| 4.3. | 模擬 FAC 試験体を用いたオリフィス下流減肉の進展測定..... | 96 |
| 4.3.1. | 試験体..... | 96 |
| 4.3.2. | 測定方法..... | 100 |
| 4.3.3. | 測定結果..... | 102 |
| 4.4. | FAC における鱗片模様についての考察..... | 124 |
| 4.5. | 結言..... | 128 |
| 第5章 | 実機 FAC への適用 | 129 |
| 5.1. | 緒言..... | 129 |
| 5.2. | 実機適用のための短時間測定の提案..... | 130 |
| 5.2.1. | 探触子のインピーダンス特性を利用した共振周波数測定法..... | 130 |
| 5.2.2. | 広帯域励磁による共振法..... | 137 |
| 5.3. | 実機 FAC への適用..... | 140 |
| 5.3.1. | 試験体..... | 140 |
| 5.3.2. | 測定方法..... | 142 |
| 5.3.3. | 測定結果..... | 145 |
| 5.4. | 実機適用における測定装置の提案..... | 154 |
| 5.5. | 結言..... | 156 |
| 第6章 | 結論 | 157 |
| 参考文献 | | 161 |
| 研究業績 | | 167 |
| 謝辞 | | 171 |

第1章 緒論

1.1. 研究の背景

配管の減肉は避けられない問題であり、どのようなプラントにおいても配管の健全性確保は重要である。これらの減肉についてはその発生メカニズム、発生個所は、近年詳細に研究がなされている^[1-7]。また国内においても、論文誌で特集が組まれるなど、重要な問題であると認識されている^[8-13]。詳細は 1.2.1 で述べるが、このような取り組みにより減肉の発生メカニズムは解明されつつある。よって減肉が生じないようなプラントの運転条件、または耐減肉特性の優れている配管材料への変更、大口徑配管への変更、配管の引き回しの変更、などが行われる。それが他の条件により困難な場合は、予測される減肉発生個所に対して定期的な配管厚さの検査を行い、減肉要因に曝される配管の健全性を担保されている。配管厚さの検査は、配管の用途ごとに各種法令、自主規格^[14, 15]に基づいて、事業者が定期的に行っている。しかし、このような対策が取られているにもかかわらず重大な事故は発生している。例えば、1986年12月に、米国の加圧水型軽水炉(Pressurized Water Reactor, 以下 PWR)において、二次冷却系配管エルボー部でギロチン破断事故が発生し、死亡事故が発生している^[16, 17]。2004年に8月に、日本の PWR において、やはり二次冷却系配管オリフィス下流で同様の事故があった^[16, 18]。Fig. 1.1-1 に PWR の主な配管とこれら2つの事故発生場所を示す。これらの事故の原因は数十年間定期的な減肉検査が行われていなかったことにある。端的に言えば、検査個所の管理が不十分であったわけであるが、発電プラントにおける配管の数、長さを考えると、その管理は簡単ではない。死亡事故ではないものの、いくつかの発電プラントで配管破断事故は発生している^[19]ことから、それは裏付けられる。例えば、Fig. 1.1-2 は火力発電におけるボイラー建屋の外観であるが、多数の配管が張り巡らされており、また配管が高所や狭所にあるのが確認できる。さらに、プラントの高経年化、高効率化により検査個所が増大する傾向にある。現代社会において、発電、化学プラントなどは必須であることから、配管厚さの管理は今後も重要な問題であり続けると言える。

よって、プラントの安全性を担保するには、より多くの測定箇所において測定精度、検査の労力の点から、十分な性能を持つ配管の厚さ測定手法が常に求められている。例えば、

- ・ 重要な検査対象については配管厚さ測定用のセンサを配管に常設する

- ・ 広域の減肉を一瞬で評価するガイド波を適用する^[20, 21]

など、性能を調査した上でこれらの技術の採用が期待されている。配管減肉についての最新の検討は、発電プラントについての議論が多い。これは、発電事業が公共の重要なインフラであること、事故が社会に多大な影響を及ぼすこと、また事業者が調査研究を行う体力を持っていることなどから、事業者の自主的な発信が求められ、行えることが理由であると考えている。

このように配管の減肉管理は大変重要であり、なおかつ検査個所はいたるところに存在することから、これについての研究は社会に対する大きな貢献となる。本論文では、その重要性、情報量の多さから、発電プラントの配管減肉管理の手法について議論を行っている。

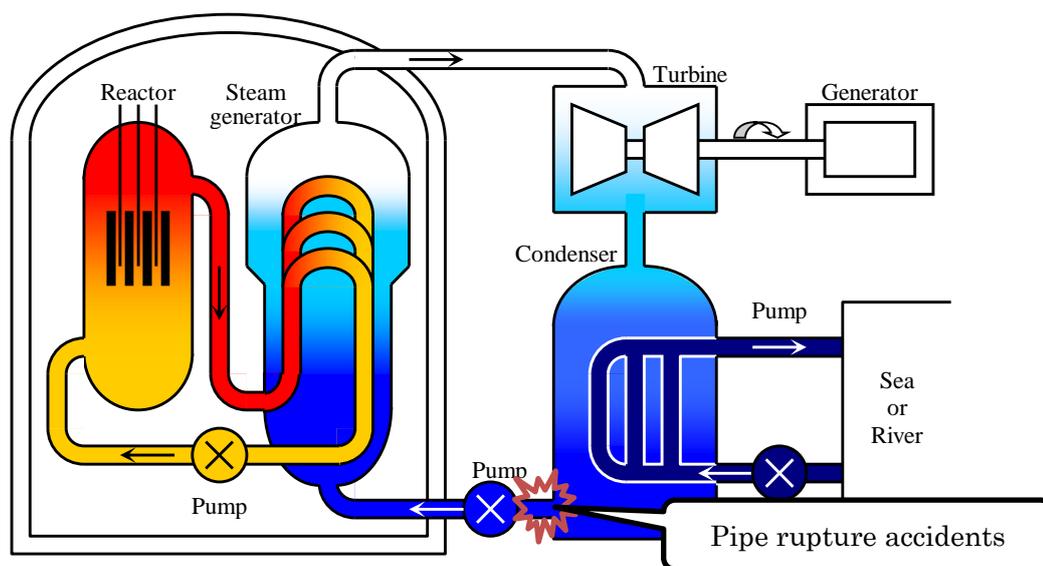


Fig. 1.1-1: Pictorial explanation of PWR. Primary coolant is water in orange and secondary coolant is water or steam in blue.

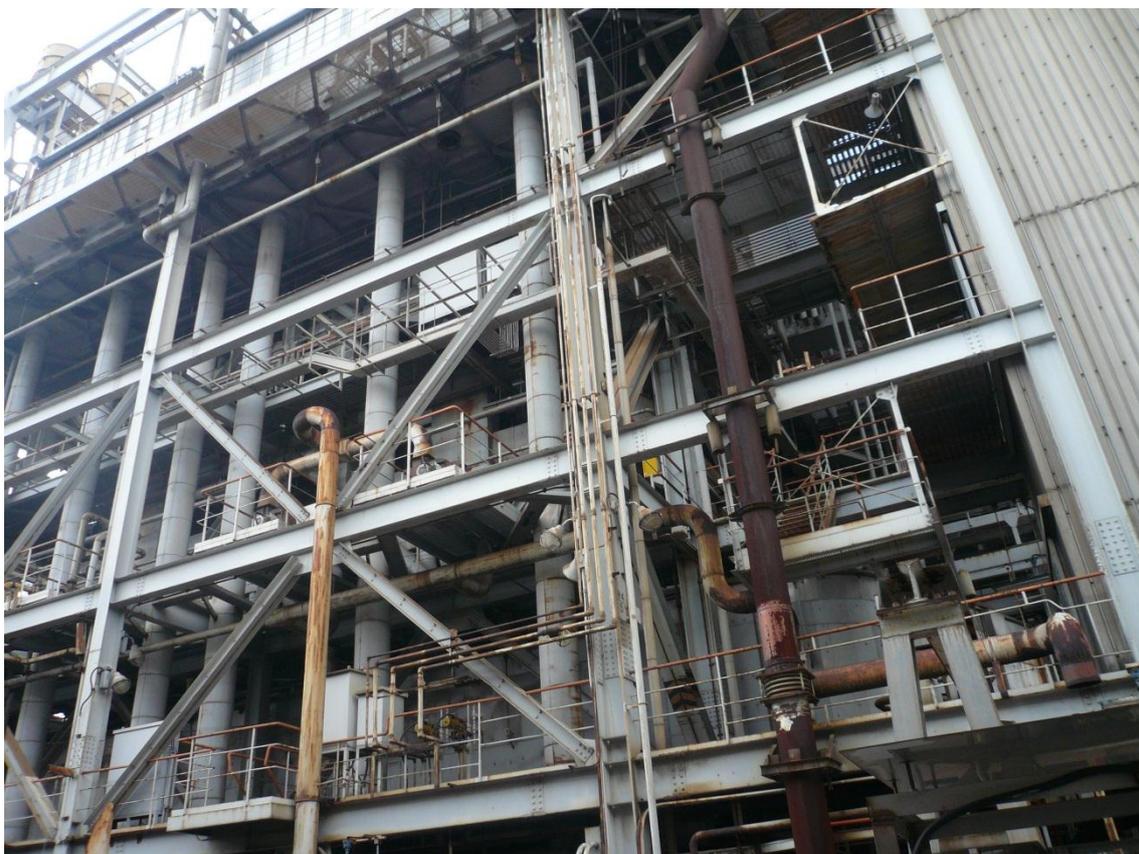


Fig. 1.1-2: A boiler building in a thermal power plant

1.2. 研究の目的

1.2.1. 配管減肉管理の現状

前節で、配管の減肉管理は規格に基づいて行われていると説明したが、これの根拠となっている配管減肉メカニズムについて明らかになっている知見を述べる。発電プラントの配管における減肉の要因として、流れ加速型腐食(Flow Accelerated Corrosion, 以下 FAC), 液滴衝撃エロージョン(Liquid Droplet Impingement, 以下 LDI)が挙げられる。FACは、高速な流体が配管壁面の酸化被膜をはぎ取ることで配管が腐食していく減肉である。Fig. 1.2.1-1 に示すように、オリフィス下流やレデューサ付近など、流体の急激な変化が起こるところに生じ、温度や pH の影響を受けることが知られている。また FAC は一般に炭素鋼に生じる減肉である。これらは Sanchez-Caldera らによるモデル化^[22]で説明できる。まず FAC の発生は以下の過程による。

- (1) 水による鉄の酸化による Fe²⁺の発生
- (2) 酸化物の空壁を通した Fe²⁺の拡散
- (3) 酸化物表面から水中への Fe²⁺の移動

これにより、FAC の発生には以下のように流速、pH、温度等が関係していることが説明できる。

- ・ 流体の急激な変化は Fe²⁺の移動を助けること
- ・ pH が低いと鉄の酸化物の溶解度が上がるので、酸化被膜の溶解が生じ減肉が進むこと
- ・ 温度が低いとレイノルズ数が低下し物質移動の程度が小さくなり温度が高いと Fe²⁺の溶解度が下がることから 150℃付近で減肉率のピークを持つこと

また流体力学的な考察により FAC が発生しやすい諸条件において、オリフィス下流においてける FAC は、配管内径を基準としたときオリフィスから 2 倍程度の位置に発生することが明らかになっている[13]。

LDI は、配管の絞り部において蒸気に含まれる液滴が音速に近い流速に加速され、配管壁面に衝突しその運動量の変化が衝撃となって壁面に機械的な損傷を与え、壁面の一部が離脱していくことで生じる。Fig. 1.2.1-2 に示すように、配管の曲がり部、エルボー等に発生する減肉である。炭素鋼だけではなく、耐腐食性能の高い SUS304 等のステンレス鋼においても発生する減肉である。その減肉形状は FAC と比較して狭い範囲に生じ、減肉面

がある程度の角度を持つ。実験や実機の調査から LDI の発生条件は明らかにされつつある [23]。

このように、減肉の発生メカニズムが明らかになっていることから以下のような対処がなされている。

- ・ 減肉の生じにくい運転条件の管理(温度, pH)。
- ・ 流速を抑えるための配管の引き回し, 配管口径の大型化。
- ・ 配管材質の変更

また, プラントの設計上の制約からこれらの対処が困難な場合,

- ・ 定期的な配管厚さ測定

が行われている。これについては日本機械学会において国内の事業者とプラントメーカー, 学术界, 国の関係機関が参加してプラントの種類ごとに規格が作成され, 事業者はその規格に基づいて配管の管理を行っている。例えば, PWR 発電プラントでは, 「発電用原子力設備規格加圧水型原子力発電所配管減肉管理に関する技術規格^[4]」が作成された。これは以下の項目で構成されている。

A 章 総則

B 章 設備管理者の責務

C 章 配管減肉管理に対する技術的要求事項

CA 章 流れ加速型腐食(FAC)による配管減肉の管理

CB 章 液適衝撃エロージョンによる配管減肉の管理

この中で, 基本となる FAC についての試験の実施方法が「CA-2300」で定められている。その測定フローを Fig. 1.2.1-3 に示す。まず, 定められた時間的間隔で, CA-2310 で定義された偏流発生部位の種類に応じた測定点の厚さ測定を実施する。この偏流部位は Fig. 1.2.1-1 などのことで, これに応じて周方向, 流れ方向に代表点を設定してある。これらはこれまでの知見から減肉が進みやすい個所とされている。また, LDI についてはこの測定点に加えて Fig. 1.2.1-2 に示すように流れがぶつかる箇所を測定を要求している。これにより配管厚さが判定基準厚さを下回らないことを確認する。下回った場合, CA-2320 に基づく詳細検査を実施する。これはおよそ 20mm 間隔の格子状の測定点を設けて最小厚さを下回る範囲を把握することを目的としている。次に, CA-3000 において CA-2310, 2320

によって求められた配管厚さから減肉の評価を行う。これは過去の測定結果から減肉の進展速度を算出し、得られた減肉率から余寿命が次回の定期検査までの期間以上であることを確認することである。下回る場合は CA-4000 に基づき、事業者は取り替えや補修などの措置を講じることになっている。

次に具体的な厚さ測定について述べる。厚さ測定は以下の手順によって行われている。

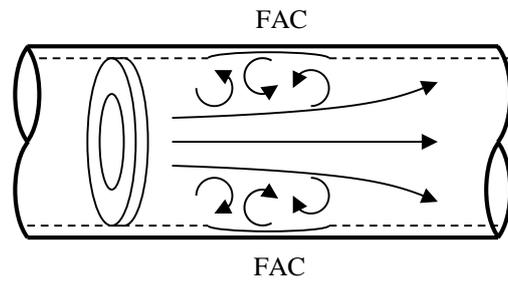
- ① 足場を組む
- ② 断熱材を外す。
- ③ 錆止め塗料を剥がす。
- ④ 2人1組で測定する。
- ⑤ 錆止め塗料を塗る。
- ⑥ 断熱材を戻す。
- ⑦ 足場を撤去する。

実際の作業を映した写真を Fig. 1.2.1-4,5,6 に示す。まず足場であるが、プラント設計の段階で点検箇所を減らす、また点検しやすいようにすることが求められるが、点検箇所が高所にある場合、厚生労働省の「労働安全衛生規則」により Fig. 1.2.1-4 のような足場の設置が求められる。当然時間もコストもかかるが、足場があっても高所作業であるから危険がないわけではない。安全性の点では他にも原子力プラントの場合、放射線管理区画にある検査箇所の測定を人間が行うことがあり、検査時間の最小化が求められる。次に断熱材であるが、プラントの高効率化のために、ほとんどの配管には保温のために断熱材が付けられている。断熱材の上から配管の検査を行う手法としてパルス渦電流^[24-26]を用いた手法があるが、減肉のわずかな進展を定量評価するのは困難で、減肉の有無を広く簡便に調べるスクリーニング検査として用いられている。よって超音波検査を実施するためには断熱材の一次的な除去を必要とする。配管の材質が炭素鋼の場合、さらに錆止め塗料が塗られている。塗料と配管の境で超音波の反射が起きるので、正確な厚さ測定ができない。よって Fig. 1.2.1-5 のように錆止め塗料の除去を必要とする。次に厚さ測定であるが、これは2人1組で行われる。Fig. 1.2.1-6 に示すように、測定者は探触子と厚さ測定器を持つため両手がふさがっており、測定結果の記録が困難になる。測定器にはメモリー機能を持つものもあるが、測定点が多いため間違いを避ける上でも記録者と同伴で作業を行う。なお、測定者には CA-2200「試験員の要件」において、非破壊検査技術の資格者であることが求められている。測定点は偏流発生部位の種類に応じて異なるが、オリフィス下流の場合、最

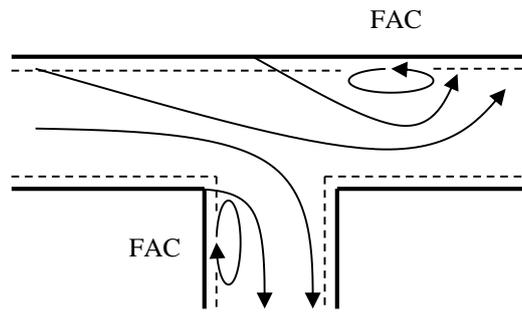
低でも1か所当たり16点、一定以上の口径を持った管であれば32点の測定が求められている。実際には事業者は場所に応じてより広い範囲の測定を行っている。また、減肉面が荒れている場合は探触子の位置により厚さ測定結果が微妙に異なるため、最も減肉の進んでいるところを探すために探触子を微妙にずらす必要がある。これは位置によって微妙に結果が異なることを意味する。条件により異なるが、減肉は1年間に0.1mmのオーダーで進展する。1年間に1回測定することを考えると、厚さ測定には0.1mmの精度が求められる。位置ズレによってこの精度を維持できなくなる恐れがあり、CA-2310では次回厚さ測定時に同じ場所を測定するため、測定点に印をつけることを求めている。測定が終われば錆止め塗料と断熱材を元に戻し、足場を撤去して終了となる。このように、配管の減肉管理には多くの作業が必要で、前処理を除いた厚さ測定に要する時間だけでも1か所当たり十分は必要となる。

減肉の発生メカニズムが明らかになっているので、検査個所の見逃しさえなければ定期検査で十分安全を確保可能である。一方で、作業の安全性、測定精度の維持の点で、さらなる改良が求められている。

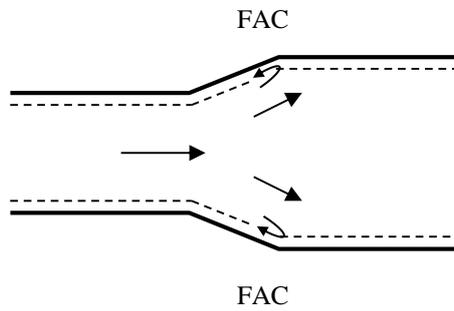
なお、ここで紹介した技術規格の作成には国の関係機関が参加しているが民間による自主規格として位置づけられていることは留意する必要がある。



(a) Orifice downstream



(b) T or elbow downstream



(c) Near reducer area

Fig. 1.2.1-1: FAC generation principle

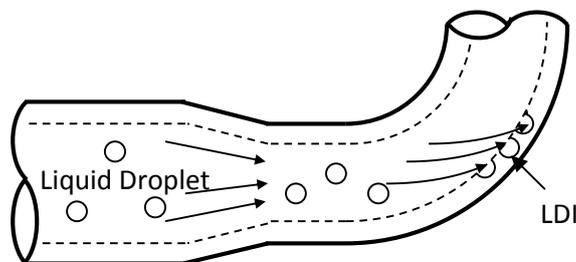


Fig. 1.2.1-2: LDI generation principle at elbow

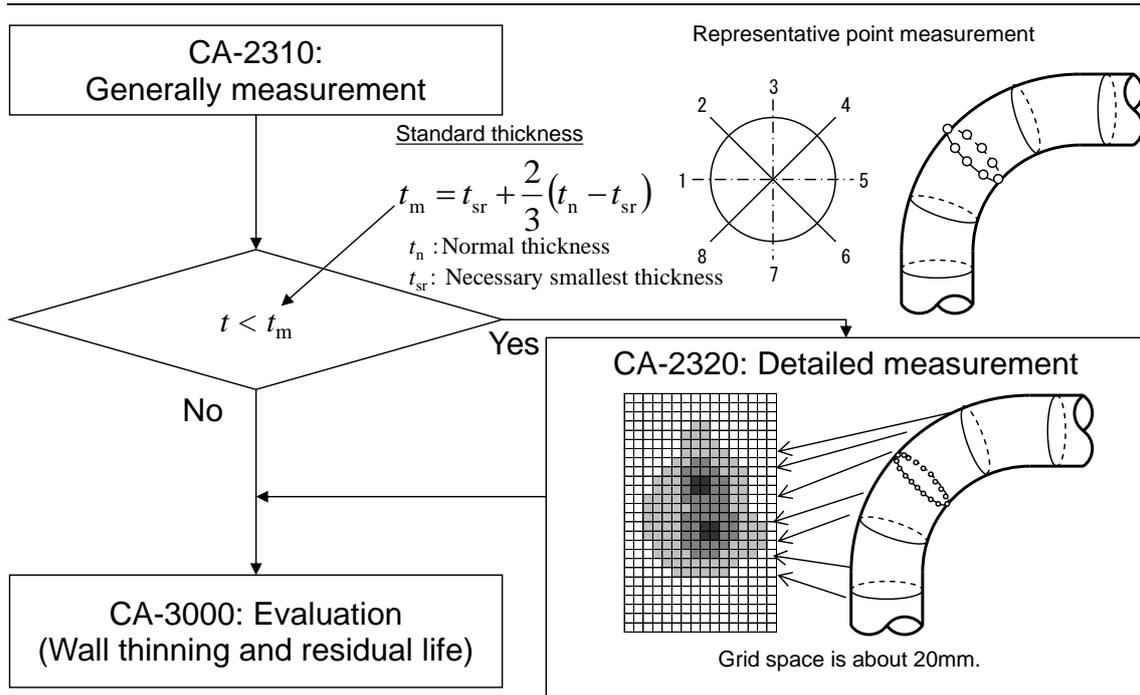


Fig. 1.2.1-3: Measurement flow using wall thickness gage

(CA-2300, JSME S NG1-2006)^[14]



Fig. 1.2.1-4: Scaffolding for thickness measurement. Scaffolding must be made, when work location is a high place.



Fig. 1.2.1-5: Preprocessing for UT. The coating needs to be removed, because pipe coating thickness affects the thickness measurement.



Fig. 1.2.1-6: Thickness measurement work using UT. Measurements are performed by two workers. Main worker measures wall thickness. Another worker records measurement results.

1.2.2. 提案する減肉管理手法

前項で現状の配管減肉管理は科学的知見に基づいて適切に管理され、配管の健全性が担保されていることを説明した。一方で、作業者の安全性の向上、減肉率を正確に把握するための改善が求められている。そこで我々は、「電磁超音波探触子を常時設置して配管の状態監視を行う手法」を提案する。これは、Fig. 1.2.2-1 に示すように電磁超音波探触子を断熱材の中に常時設置し、プラント内の任意の場所から任意のタイミングで配管厚さを測定する手法である。この手法の利点として以下の点が挙げられる。

- ・ 作業者が高所や放射線管理区画に入る必要がないため、作業者の安全が確保される。
- ・ 断熱材の内側に設置することから検査時に断熱材を除去する必要がない。
- ・ 電磁超音波の原理上の利点から、錆止め塗料を除去する必要がない。
- ・ 探触子を動かさないことから探触子の位置ズレが発生しない。
- ・ 時間基準ではなく、配管の状態を基準とした配管の管理が可能になる。

一方で、日本機械学会の技術規格では配管厚さ測定技術の限定はされていないが、超音波厚さ計を前提に作成されており、他の手法を用いる場合には技術的妥当性が求められている。本論文の目的は、配管減肉測定において従来の超音波厚さ計に対して電磁超音波探触子の使用が技術的に妥当であることを明確にすることとする。

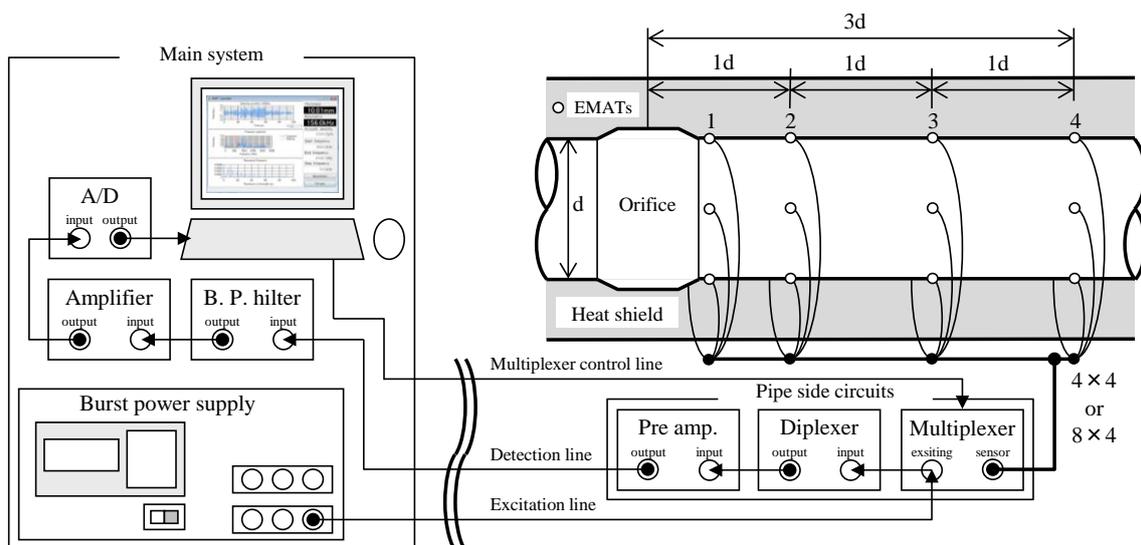


Fig. 1.2.2-1: A proposal pipe wall thinning management

1.3. 研究の概要と構成

本論文では、より安全なプラント管理のために、EMATによる配管減肉の状態監視を提案した。EMATは種々の利点により、これに適したセンサである。一方で、減肉のような超音波の反射面が平面ではない場合のEMATを用いた減肉評価は、これまで十分に検討されてこなかった。EMATを配管の減肉診断に用いる場合には、十分な性能を持っていることを確認し、減肉部の測定に適した方法を考えることが重要である。

以下に本論文の各章の構成、及び概要を示す。

第1章 緒論

第2章 電磁超音波による厚さ計測

第3章 パルスエコー法を用いた配管に生じる減肉の評価

第4章 共振法を用いた模擬FAC減肉評価

第5章 実機FACへの適用

第6章 結論

第1章では、本研究の背景および目的、ならびに本論文の構成を述べる。

第2章では、超音波を用いた厚さ計測について述べながら、提案する配管減肉の状態監視において、電磁超音波が優位な特徴を持っていることを述べる。

第3章では、減肉を機械加工した試験体に対してパルスエコー法を用いて減肉形状の評価を試みる。また、その検出限界を明らかにする。

第4章では、要求される厚さ測定分解能に対してEMATが十分な性能を持っていることを確認する。その性能が実機を想定した模擬試験体に対して有効であることを確認する。

第5章では、実機適用への問題点の一つである測定時間について、短時間測定の手法を提案する。次に、実際のFACを持つ試験体に対してEMATによる共振法を適用し、従来の超音波探触子による厚さ評価と同程度の性能を持っていることを確認する。

第6章では、本論文の総括を行う。

第2章 電磁超音波による厚さ測定法

2.1. 緒言

音を用いた非破壊検査の例として、陶磁器の内部欠陥を見つけるためにハンマーで叩いて打音の変化を観察する手法が古くから用いられてきた。形状が大きいほど打音の波長は大きい。つまり、ひびなどで音の伝搬が妨げられると、打音の波長は小さくなる。この場合、打音の周波数は検査対象の形状、叩く位置、強さに依存する。また人間が音を聴く場合は可聴域の音を使うことになる。一般に人の可聴域は高くても 20kHz 程度と言われ、また聴力は人々なので微妙な周波数の違いを定量的に評価することは期待できない。1930 年頃から水晶などを用いた振動子により、MHz オーダーのより高い周波数の超音波を、電氣的に制御することで再現性良く発振できるようになった。これを用いて、検査対象の形状に依存せず、かつ再現性が良く、人の可聴域より高い音を使うことでより小さい欠陥を探傷する非破壊検査技術として、超音波計測が広く使われている。現在まで検査手法や振動子の改良により日々性能は向上し、工学だけではなく医学の世界でも活用されているのは周知である。

本章では、最初に従来の探触子と本論文で活用する電磁超音波の特徴について述べる。次に超音波を用いた厚さ計測の手法である、パルスエコー法と共振法について説明する。これらを通して、提案する手法において従来の振動子と比較して電磁超音波が優位な特徴を持っていることを述べる。

2.2. 超音波探触子

2.2.1. 従来の超音波探触子

超音波計測に使われている電気音響変換素子には、圧電素子、磁歪素子、蓄電素子等が挙げられる。これらの特徴を Table. 2.2-1^[27]に示す。周波数定数(Frequency constant)は厚さ 1mm の素子の共振周波数を示している。該当欄が斜線の素子は、共振周波数は素子を保護する部材などに支配されることを意味する。よって、使用したい周波数に合わせて素子の形状を決めることで、最大のエネルギーを取り出すことができる。逆に言うと素子の形状に使用周波数が制限される。素子の共振周波数は次節で述べる共振法を用いた厚さ測定において重要な意味を持つ。これらの素子は用途に応じて使い分けられている。例えばポリフッ化ビニリデン(PolyVinylidene DiFluoride: PVDF)は使用可能な周波数範囲が広く、大きな圧電効果^[28]が期待できるため、近年注目されている素子である。チタン酸ジルコン酸鉛(lead zirconate titanate: PZT)はこれらの素子の中で特に大きな変位を取り出すことのできる素子で、探傷や厚さ計測に最もよく使われている。水晶は機械的に強く特性も安定しているので、古くから使われている。ニオブ酸リチウム(Lithium niobate)は強誘電体のキューリー点が 1,200℃と高く、高温での使用に適している。フェライトは 0.1MHz 以下の特に強力な発振に用いられる。蓄電素子は音響インピーダンスの低い空気中への超音波の送受信に適している。数十 mm 程度の厚さ測定や探傷の分野においては、周波数、音圧から、PZT が用いられることが多い。この分野では、これらの素子を組み込んだセンサを探触子と呼ぶ。

Table 2.2.1-1: Electroacoustic transducer with ultrasonic measurement^[27]

| Principle | Name | Operation frequency range (MHz) | Frequency constant (MHz×mm) |
|---------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Piezoelectric | Quartz | 0.4 or more | 2.87 |
| | Lithium sulfate | 1-15 | 2.73 |
| | PVDF | 2-150 | / |
| | PZT | 0.2-10 | About 2.0 |
| Magneto - striction | Ferrite | 0.014-0.1 | / |
| Static electricity | Capacitor | 0.1-1 | / |

探傷や厚さ測定で最も使われている PZT について、より詳細に説明する。電界と変位を相互変換する圧電効果を生じる物質であり、これらの効果を得られる物質の中では一般に最も大きな変位を取り出すことができる。ジルコン酸鉛(PbZr_3)とチタン酸鉛(PbTi_3)の固溶体であり単結晶ではない。セラミックなので平板以外にも球や桶、円筒など様々な形のセンサを作ることができる。PZT を用いた探触子の構造を Fig. 2.2.1-1 に示す。図では PZT の残響を抑えるためのダンパやケースは省略している。基本的に、PZT を電極で挟むだけの単純な構造である。電圧を加えるだけで機械的な動作なしに比較的大きな振動を発生できるため、PZT は小形で丈夫な探触子を作ることができる。これらの理由により、超音波探触子として広く用いられている。鉛を含んでいるので環境にとって有害ではあるが、小形で音圧の大きい探触子を実現できることから探傷においては極めて有効であり、RoHS 指令の付帯規格にて除外対象^[28]となっている。またインクジェット式のプリンタのヘッドにも使われている。

PZT に代表される従来の超音波探触子の特徴として、探触子自体が振動することが挙げられる。したがって、探触子から被試験体に超音波を入射するには、探触子と被試験体の間の音響インピーダンスを十分小さくする、つまり十分に接触させる必要がある。具体的には、グリセリンのような粘性のある媒質を被試験体の表面に塗ってから、探触子を適度な強さで押し付ける必要がある。粘性のある媒質を使うのは、壁や天井などを検査するとき、粘性が低いと媒質を維持できないからである。それ以外の場合は状況に応じて水や、水を嫌う場所では油を媒質として用いることがある。媒質を必要とする点は EMAT と異なる点である。Fig. 2.2.1-1 からわかるように、通常、探触子の変位は垂直方向で用いる。よって発生する波は縦波となる。横波を発生させるためには図の探触子を水平に配置すればよいように思われるが、液体の媒質ではそのような方向の超音波を被試験体内部に入射することは容易ではない。この点も EMAT と異なる点である。本論文で用いた超音波厚さ計を Fig. 2.2.1-2 に示す。GE Inspection Technologies 社 DM4 で、用いた探触子のセンサ面積は約 $3 \times 3\text{mm}$ である。

PZT が超音波探触子として良く使われるのは、超音波を効率的に発生させることができるからである。一方で探触子を配管に常時設置する場合、PZT を含む従来の探触子は媒質が必要な点が適用を難しくする。なぜなら媒質を常時供給することは機械的な構造を必要とするし、溶接などで探触子と配管を固定するのは測定点の多さを踏まえると多くの手間を必要とする。また探触子を強く接触させると探触子自身の影響により、被試験体の共振

周波数を正確に測れなくなる問題がある。

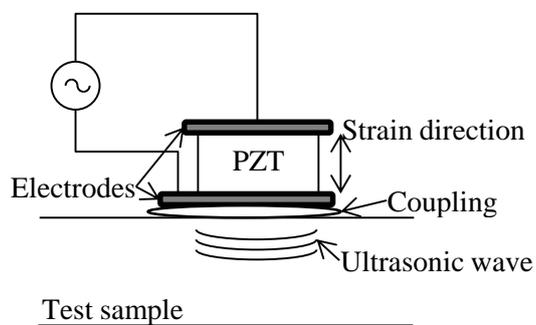


Fig. 2.2.1-1: Pictorial explanation of PZT



Fig. 2.2.1-2: Wall thickness gage using PZT

2.2.2. 電磁超音波探触子

電磁超音波探触子(Electro-Magnetic Acoustic Transducer, 以下 EMAT)は 2.2.1 で紹介した探触子とは原理が異なる探触子である。2.2.1 で紹介した探触子は自身が変形することにより超音波を発生させるが, EMAT は検査対象表面に直接超音波を発生させる。つまり媒質が不要な, 非接触での探傷を可能とする。これは EMAT を構成する磁石によるバイアス磁場と, 同じく EMAT を構成するコイルによって渦電流によるローレンツ力と, またコイルに印加したバースト波による磁歪が, 検査対象表面に生じるからである。これについての議論は, 1935 年の Wegel らの研究^[29]や, 1937 年の Randall らの研究^[30]が確認できる。これらは内部摩擦についての議論である。非破壊検査技術としては, 1970 年代に R. B. Thompson^[31, 32]らにより, ローレンツ力や磁歪を使った電磁超音波探触子の駆動原理について詳しく検討されているのが最初である。また, 同時期に川島ら [33, 34, 35]や B. W. Maxfield^[36, 37], Fros^[38]によって電磁超音波の研究が行われている。その後, 国内においては鉄鋼, 重工メーカーを中心に応用面での研究^[39]がなされている。また, 平尾らによって音弾性材料評価^[40, 41]への応用がなされ, 現在に至るまで大学等において探触子のデザイン^[42]や数値解析モデル^[43], 応用について広く研究^[44-53], 紹介^[54]されている。また, EMAT の欠点である検出感度について受信に光ファイバとドップラー効果を用いて改善する手法が提案されている^[55]。さらに本研究の主題である配管厚さ計測についてもいくつかの研究がなされている^[56-60]。なお, これらの研究において配管に生じる減肉形状を想定したより実践的な研究は行われていない。また高温環境についての研究はいくつかのグループ^[61-63]で行われている。

EMAT の送信と受信のメカニズムについて説明する。まず, 送信について説明する。非磁性体の場合は物体に生じる力はローレンツ力のみであるが, 検査対象が磁性体の場合はローレンツ力を含め以下の力が発生する。

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_Q + \mathbf{F}_{MS} \quad (2.2.2-1)$$

\mathbf{F}_L はローレンツ力, \mathbf{F}_Q は検査材料に生ずる磁化と磁場との相互作用により発生するクーロン力, \mathbf{F}_{MS} は磁歪^[65]により発生する力を表している。

ローレンツ力 \mathbf{F}_L は以下の式より求められる。

$$\mathbf{F}_L = \mathbf{J}_z \times \mathbf{B} \quad (2.2.2-2)$$

$$\mathbf{J}_z = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}_z}{\partial t} \quad (2.2.2-3)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_{Coil} = \mathbf{B}_0 + (\nabla \times \mathbf{A}_z) \quad (2.2.2-4)$$

\mathbf{J}_z は渦電流， \mathbf{A}_z は磁気ベクトルポテンシャルを表す。ただし，磁場がXY平面にあるとする。また， \mathbf{B}_0 は永久磁石による磁束密度， \mathbf{B}_{Coil} は渦電流により動的に生じる誘導磁束密度を表す。検査対象が非磁性材の場合，超音波の発生に寄与するのはこの \mathbf{F}_L のみである。

次に，クーロン力 \mathbf{F}_Q は以下の式より求められる。

$$\mathbf{F}_Q = (\nabla \mathbf{H}_c) \cdot \mathbf{M}_0 \quad (2.2.2-5)$$

\mathbf{H}_c は渦電流により動的に生じる誘導磁場， \mathbf{M}_0 はバイアス磁気モーメントを表す。

次に，磁歪による力 \mathbf{F}_{MS} は以下の式より求められる。

$$\mathbf{F}_{MS} = \nabla \cdot (\mathbf{o} \cdot \mathbf{H}_c) \quad (2.2.2-6)$$

\mathbf{o} は磁歪定数テンソルを表している。 \mathbf{o} は \mathbf{B}_0 の影響を受けており， \mathbf{F}_{MS} は \mathbf{B}_0 により変動する^[54]。定性的にはFig. 2.2.2-1に示すように， \mathbf{F}_L は \mathbf{B}_0 に比例するのに対して， \mathbf{F}_{MS} が最も大きな値をとるユニークなバイアス磁場が存在する。これは磁束密度と透磁率の関係に似ている。また，バイアス磁場が検査材料に垂直である場合，磁歪効果による力の影響は非常に小さいという研究がある^[64]。また \mathbf{F}_{MS} は \mathbf{H}_c に対して水平，垂直方向に発生する。

ここで，本研究で用いるSH波用EMATが発生させる超音波について議論する。本研究で用いるEMATをFig. 2.2.2-2に示す。2つの磁石と1つのコイルを持つ。まず，ローレンツ力について検討する。Fig. 2.2.2-3に \mathbf{J}_z ， \mathbf{B}_0 を示す。 \mathbf{F}_L はフレミングの左手の法則により，横方向に発生する。次に，クーロン力について検討する。 \mathbf{H}_c と \mathbf{M}_0 をFig. 2.2.2-4に示す。 \mathbf{H}_c と \mathbf{M}_0 はコイル直下では直交しているため， \mathbf{F}_Q はほぼ0である。最後に磁歪について検討する。 \mathbf{F}_{MS} と \mathbf{H}_c をFig. 2.2.2-5に示す。コイル直下において \mathbf{F}_{MS} は検査対象面に対して垂直方向と水平方向に発生する。これは同程度の縦波と横波が発生することを意味する。

以上の検討から、SH 波用 EMAT が強磁性体に与える超音波は、ローレンツ力の力は横波となり、クーロン力はほぼ発生せず、磁歪は縦波、横波を発生させるが強いバイアス磁場を加えているので小さくなることから、横波が支配的になると考えられる。したがって、非磁性体であっても強磁性体であっても、検査対象の表面には横波(SH 波)の超音波が誘起されることになる。

次に受信について説明する。材料底面に達した超音波の反射波が材料表面付近に到達するとき、振動による弾性体の変位と永久磁石による静磁場によって誘導起電力 $\sigma(\partial \mathbf{u} / \partial t) \times \mathbf{B}_M$ が生じる。この誘導起電力によって生ずる反作用磁場の影響を受信信号としてコイルで検出する。誘導起電力は受信コイルにおける磁気ベクトルポテンシャルから計算でき、送信時の数学モデルと同様に以下の式で表される。

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}_z^{coil}}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla \mathbf{A}_z^{coil} \right) = \sigma \left(B_y \frac{\partial u_x}{\partial t} - B_x \frac{\partial u_y}{\partial t} \right) \quad (2.2.2-7)$$

\mathbf{A}_z^{coil} はコイルにおける磁気ベクトルポテンシャル、 u_x, u_y は検査対象表面の変位を表す。コイルの i 番目のループを貫く磁束 Φ_i は次の式で表される。

$$\Phi_i = \int_{coil_i} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \int_{coil_i} (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{s} = \int_{coil_i} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.2.2-8)$$

よって誘導起電力は N 個のループがある場合、電磁誘導の法則より検出電圧 V は以下の式で表される。

$$V = - \sum_{i=1}^N \frac{\partial \Phi_i}{\partial t} \quad (2.2.2-9)$$

EMAT が古くから研究されており、非接触探傷が可能という利点があるにもかかわらず、超音波試験ではほぼ PZT が使われているのは、非接触と言っても一般に数 mm 程度しか検査対象表面から離せないこと、検出感度が低いことから探触子の有効面積を小さくすることが困難で、高リフトオフでの使用、凹凸のある検査対象物への適用には必ずしも成功

していないからである。

しかし、EMAT は比較的身近な材料である磁石とコイルで構成され、容易に作ることができる。また鉛は含まれていない。我々の用いた磁石は1個2千円程度である。コイルは手巻きの場合、材料費は1個数円である。作業量を加味しても、量産することでより安価になることが期待できる。また、磁石とコイルは適切な材料を選択することで、高温での使用が望める。放射線下での使用も大きな影響はないと考えられる。よって、EMAT が PZT と同程度の厚さ測定性能を持っていれば、PZT では困難な、探触子を常時設置しての減肉モニタリングに用いることが可能であると考えられる。

以上のことから、PZT と比較すると EMAT の利点として以下が挙げられる。

- ・ 構造が単純で比較的安価であること
- ・ 高温や放射線下での利用が可能であること
- ・ 非接触であることから探触子自身の機械的性質や媒質の影響を全く受けないこと
- ・ コイル形状および配置が比較的容易に設定でき、ラム波、円筒波の発生が容易であること
- ・ SH 波を発生させることのできる唯一の方法であること

したがって、PZT を補完するような使い方が有効であると考ええる。

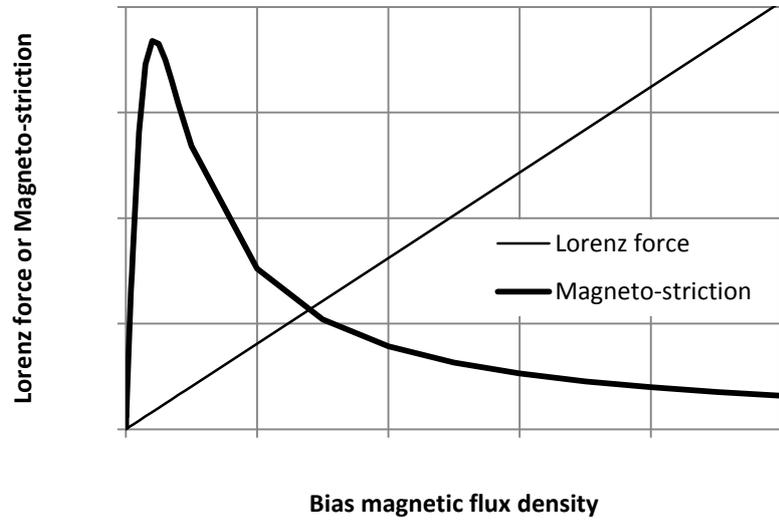


Fig. 2.2.2-1: EMAT 's Frequency characteristic of Lorentz force and magneto-striction force

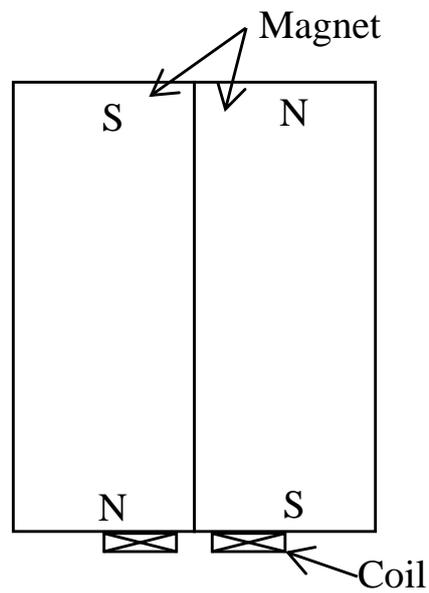


Fig. 2.2.2-2: The SH wave EMAT's consist. The sensor consists of two permanent magnets and single coil.

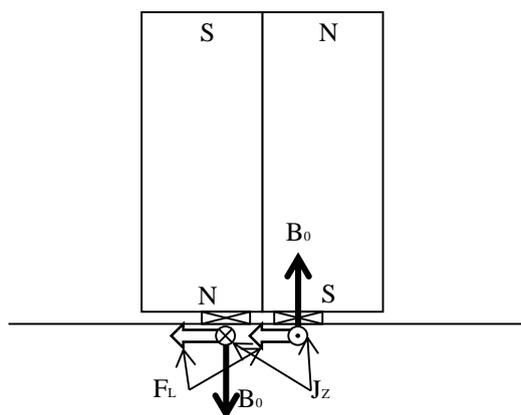


Fig. 2.2.2-3: Lorentz force of EMAT

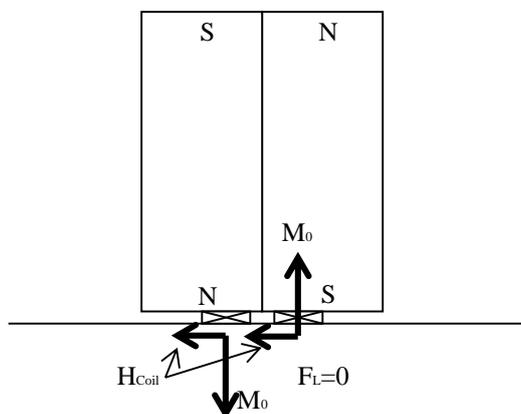


Fig. 2.2.2-4: Coulomb force of EMAT

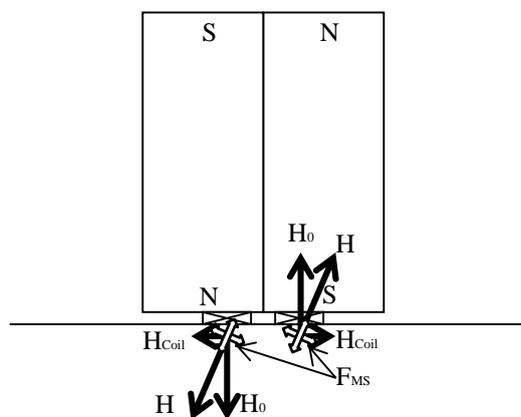


Fig. 2.2.2-5: Magnetostriction force of EMAT

2.3. 超音波を用いた厚さ測定法

超音波を用いた厚さ測定法には、透過法、パルスエコー法、共振法が挙げられる。透過法は、送信探触子と受信探触子で被試験体を挟み、透過時間と音速から被試験体の厚さを測定する手法である。しかし、配管では管内面に探触子を設置することはできない。ここではパルスエコー法と共振法について述べる。本節で示す測定例は、すべて EMAT による。

2.3.1. パルスエコー法

センサの出力の時間変化から検査対象の厚みを測定する方法がパルスエコー法である。Fig. 2.3.1-1 に示すようなバースト波を探触子に印加する。送信された超音波は検査材料底面で反射し、表面に超音波が返ってきたときに Fig. 2.3.1-2 のようなピーク(エコー)が現れる。そのエコー間隔 Δt から対象の厚み T を、次式から得ることができる。

$$T = \frac{v\Delta t}{2} \quad (2.3.1-1)$$

Fig. 2.3.1-2 は SS400 材の板材の測定結果である。この横波の音速は 3.24km/s であるので、式(2.3.1-1)から、厚さは 20.0mm であることが分かる。音速が十分に早いので、鉄板の厚さ測定は一瞬で完了する。一方で、検査材料の厚みが薄くなるとエコー間隔が小さくなり、Fig. 2.3.1-3 のようにある厚みでエコーが重なってしまうため、測定できる厚みに限界が生じる。

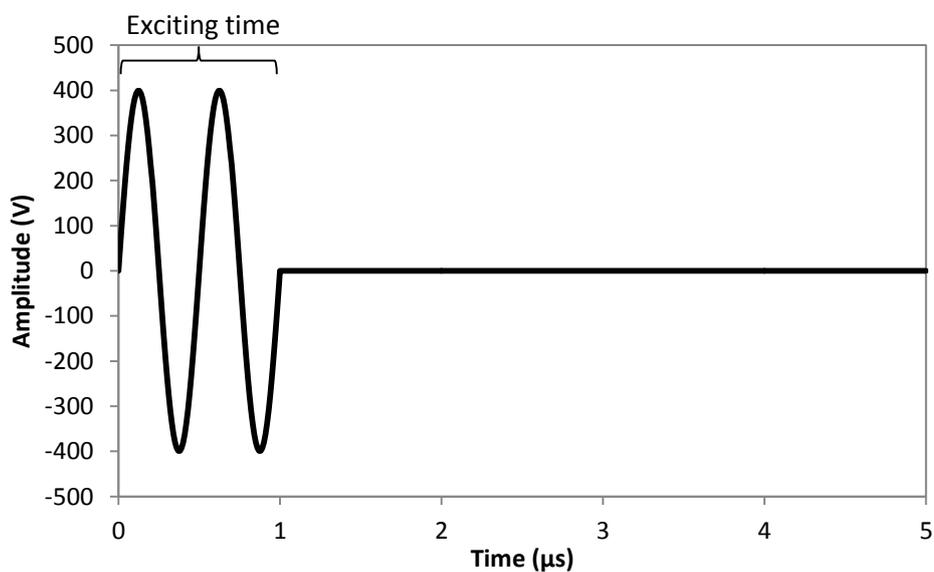


Fig. 2.3.1-1: Exciting waveform of transmitted burst wave (2MHz).

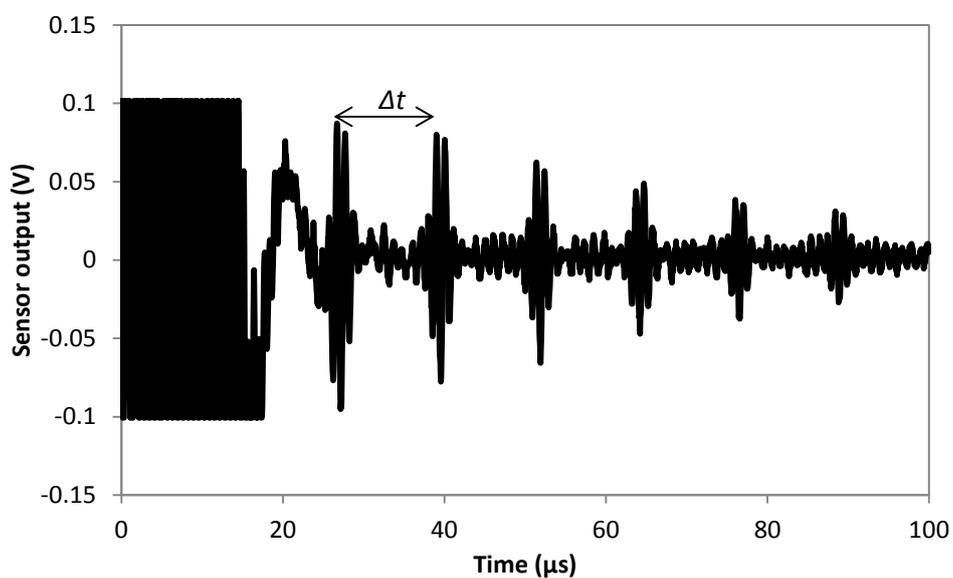


Fig. 2.3.1-2: 20mmT receive waveform of SS400

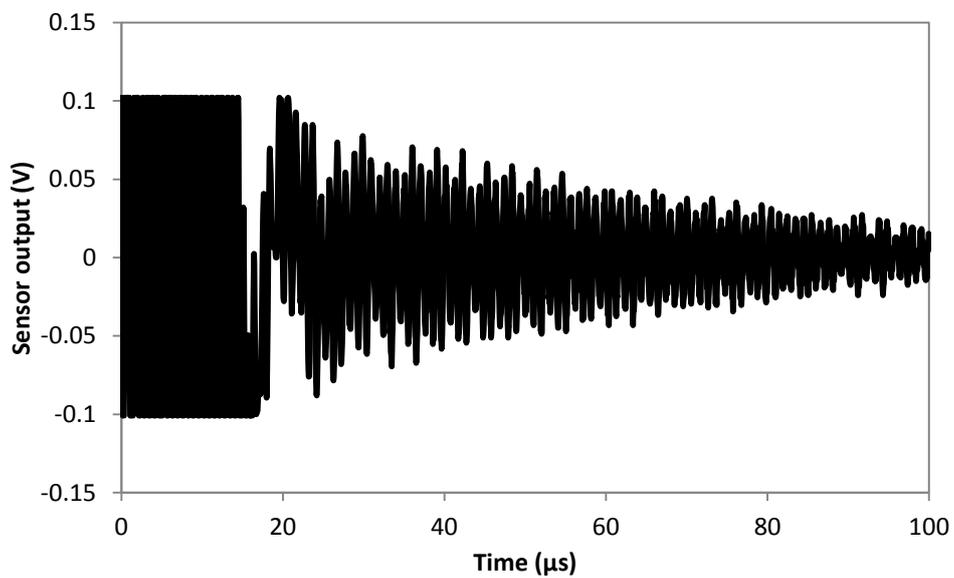


Fig. 2.3.1-3: 5mmT receive waveform of SS400

2.3.2. 共振法

共振法は、試験体表面に導入した超音波が、厚さに対してユニークな周波数であったとき減衰が極端に小さくなる現象「共振」、を利用した測定法である。EMAT を用いた共振法については、1990年代から平尾らによって電磁超音波共鳴法(Electro-Magnetic Acoustic Resonance, EMAR)として発表がなされている^[65, 66]。共振を用いることで検出感度と厚さ測定分解能を飛躍的に向上させた。平尾らはこれにより、金属の結晶粒度や

パルスエコー法と同様に、SS400材の板材を、共振法を用いて測定する。EMATに印加するバースト波の周波数を、ある程度の周波数範囲で掃引する。ここでは1000kHzから2000kHzを1kHz間隔で掃引した。具体的には、1001kHz, 1002kHz, …, 1999kHz, 2000kHzと1001回の励磁と検出を繰り返す。Fig. 2.3.2-1は、1000kHz, 100波の時の励磁波形である。これらの励磁によって得られた検出信号の例をFig. 2.3.2-2に示す。これらは、1280kHzと1294kHzの検出信号である。なお、励磁に用いたバースト波は0μsで停止している。周波数によって検出信号が大きく異なることが確認できる。1280kHzでは振幅が0.1mV以下であるのに対して、1294kHzでは30μsまでは振幅がレンジオーバーするほど大きくなっている。これは試験体内部で1294kHzの超音波が共振していることを表している。

共振状態は、非共振状態と比較すると極端にエネルギーが大きい状態であり、検出信号 v_i から次式を用いることで共振エネルギー R を判定することが可能である。

$$R = \sum_{i=1}^n (v_i)^2 \tag{2.3.2-1}$$

Fig. 2.3.2-3は掃引して得られたすべての検出信号を式(2.3.2-1)を用いてまとめた結果である。エネルギーの高い周波数、つまり共振周波数は1294,1618,1942kHzであった。 Δf は324kHzであることから、1294kHzは4次の共振周波数であることがわかる。共振周波数 f と次数 n 、試験体材料の音速 c から厚さ T は次式で求めることができる。

$$T = n \frac{v}{2f} \tag{2.3.2-2}$$

ここでは、共振周波数は1294,1618,1942kHzとなり Δf は324kHzであった。 $v=3.24\text{km/s}$ で

あるから式(2.3.2-2)より、厚さは被試験体の厚さは 5.00mm となる。これにより、パルスエコー法では困難な 5mm 以下の厚さ測定が可能であることを確認した。むしろ、被試験体の厚さが薄い方が Δf 、共振エネルギーが大きくなるため、共振法は、薄板の厚さ測定が容易である。

事前に被試験体の大よその厚さが分かれば次数と共振周波数は推定でき、その周辺の周波数で励磁すればよいが、そうではない場合は Δf が必要であるためある程度広い周波数域で励磁を行う必要がある。 Δf から、 T は次式で求めることができる。

$$T = \frac{v}{2\Delta f} \quad (2.3.2-4)$$

本研究では、測定システムに汎用性を持たせるため、 Δf を用いた式(2.3.2-4)を用いることとする。

EMAT は、電磁場によって試験体表面に直接超音波を発生させるため、超音波の周波数は EMAT の機械的な固有振動数に依存しない。そのため圧電素子型の探触子と比較して広い周波数域での使用が可能である。使用した EMAT はおおよそ 500kHz から 3000kHz の周波数帯で使用することができる。

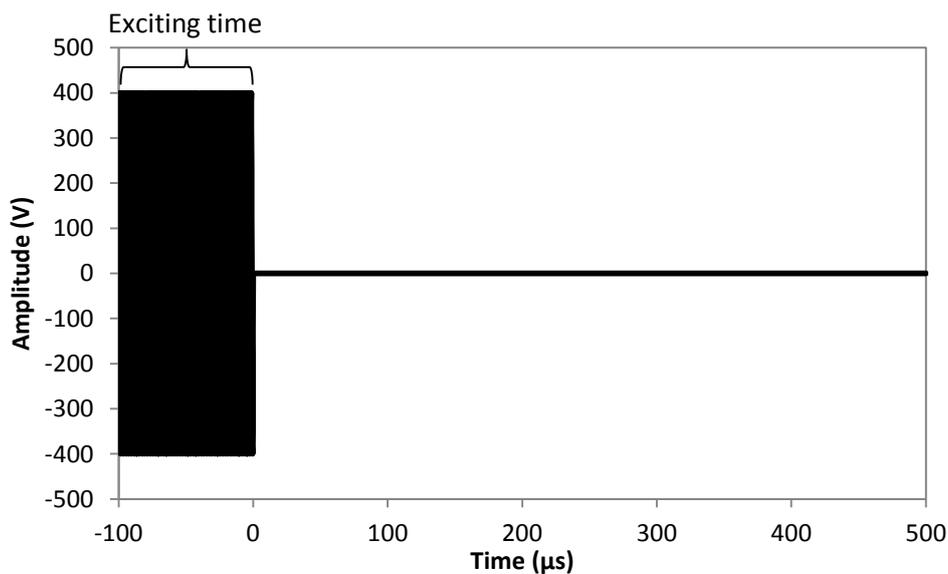


Fig. 2.3.2-1: Exciting waveform of transmitted burst wave

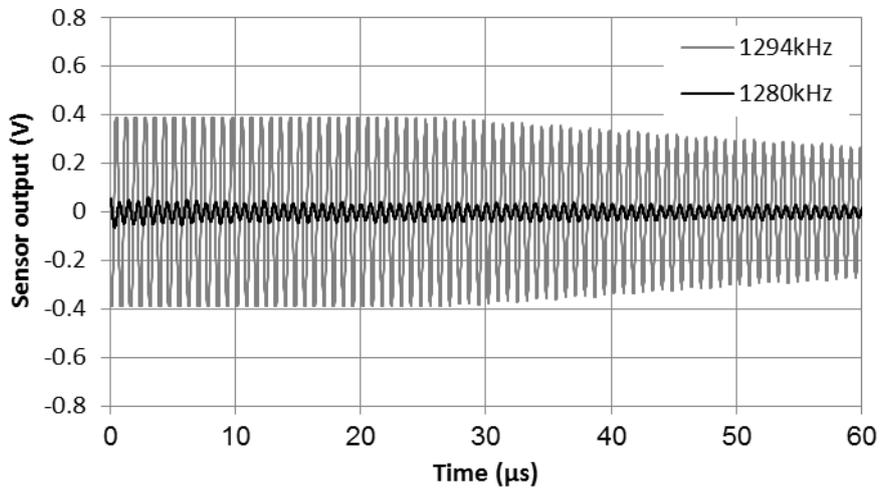


Fig. 2.3.2-2: 5mmT receive waveform of SS400

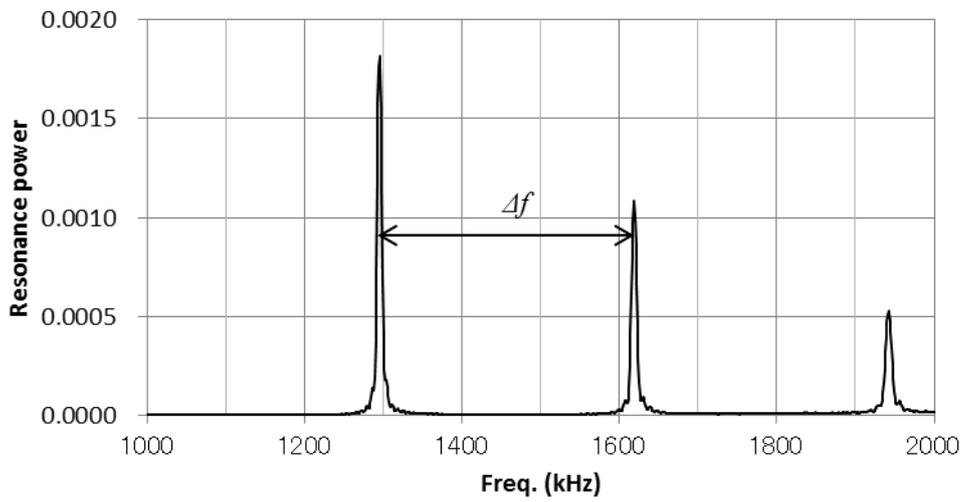


Fig. 2.3.2-3: 5mmT resonance waveform of SS400

2.4. 結言

本章では、超音波探触子として良く使われている PZT と、本論文で活用する EMAT の特徴について述べた。最初に、EMAT は、PZT 型の探触子にはない以下の特徴を持っていることを明らかにした。

- ・ 構造が単純で比較的安価であること
- ・ 高温や放射線下での利用が可能であること
- ・ 非接触であることから探触子自身の機械的性質や媒質の影響を全く受けないこと
- ・ コイル形状および配置が比較的容易に設定でき、ラム波、円筒波の発生が容易であること
- ・ SH 波を発生させることのできる唯一の方法であること

また、本研究で用いた SH 波用 EMAT の超音波発生原理について明らかにした。

次に、超音波を用いた厚さ計測の手法である、パルスエコー法と共振法について説明した。特に共振法については広い周波数帯域を持つことから、提案する減肉モニタリング手法において、EMAT の優位性が明らかになった。

第3章 パルスエコー法を用いた減肉の評価

3.1. 緒言

一般に用いられている圧電素子タイプの超音波探触子を含めて、管の減肉検査に超音波を適用するときには、減肉による反射面の凹凸、管の曲率について留意しなければならない。なぜならこれらによって超音波が散乱し、探触子まで戻ってくる超音波のエネルギーが減少するからである。EMAT の場合は圧電素子タイプの探触子と比較して検出限界のエネルギー強度の閾値が低いため、減肉検査には積極的に使われてこなかった経緯がある。よって、これらが与える影響について定量的に理解することは、管の減肉検査には有用である。一方で、減肉は複雑な形状を持ち、それに対して定量的な評価を行うのは形状のパラメータが多く、困難である。

本章では、パルスエコー法を用いた EMAT による減肉評価を、以下の手順で検討を行う。減肉形状と管の曲率を同時に考慮すると問題が複雑になるので、まず平板に部分減肉を加工して検討を行う。次に、実際の減肉は3次元の複雑な形状を持ち、減肉のモードによってさらに形状は分かれるので、加工する部分減肉は2次元形状に絞り、代わりに一つの試験体で探傷面に対する様々な角度を模擬できるようにその形状を半楕円とする。最後に、長径、短径の比を変えることで、減肉のモードである LDI と FAC を模擬する。すべての減肉形状を実験にて模擬することは困難なので、シミュレーションを用いて補完を行う。これによって反射面の角度と厚さ測定の可否、減肉診断手法の提案を行う。次に管においても同様の実験を行い、母材形状の影響を確認する。

これらを通して、減肉形状が EMAT の検出性能に与える影響について定量的な評価を試みる。

3.2. 平板模擬減肉試験体による予備実験

3.2.1. 試験体

本節では、部分減肉を Fig. 3.2.1-1 に示す半楕円減肉試験体で模擬する。厚さ 15mm の平板の裏面に半楕円をワイヤ放電により加工している。減肉幅に相当する半楕円の径 a を 10, 20, 30mm, 減肉深さに相当する b を 3, 5, 10mm とし、9 体の試験体を作成した。一般に LDI は、FAC と比較して急な減肉面を持ち、半球型の形状を持つ。そこで減肉深さ b が減肉幅 a より大きいとき、その減肉は LDI モデルとした。逆に減肉幅 a が減肉深さ b より大きいとき、FAC モデルとした。実機に生じる減肉はその要因により様々な形状になるが、ここでは連続的に変化させた半楕円の模擬減肉を複数用意することで、実機に生じる様々な減肉形状の模擬を試みている。

被試験体の材質は炭素鋼ではなく、SUS304 材を用いた。SUS304 は、耐腐食性能向上のために炭素鋼からの置き換えに用いられることが多い。FAC の発生しにくい材料である。一方で結晶粒が大きいと超音波の減衰が炭素鋼と比較して大きい。このように炭素鋼とは異なる特徴を持つが、本章で検討する減肉形状の影響は、炭素鋼管においても SUS304 で得られた知見が共有できると考えている。

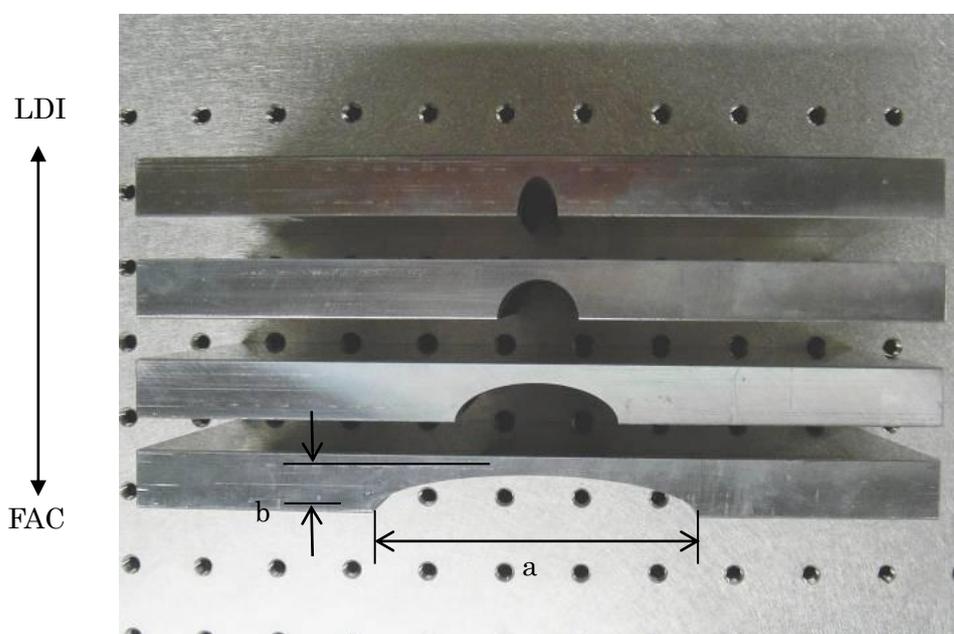


Fig. 3.2.1-1: Photograph of specimens with a mock-up corrosion. 'a' is width of corrosion. 'b' is depth of corrosion.

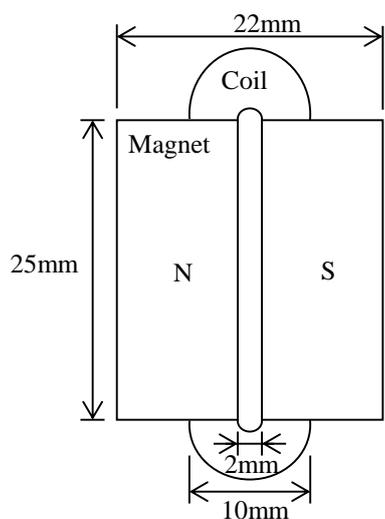
3.2.2. 測定方法

試験体内部の超音波の振る舞いを理解するために、有限要素法を用いて電磁場と振動の練成解析を行うシミュレータを利用する。このシミュレータは減肉形状を、写像法を用いてモデル化し、任意の減肉形状に対する検出波形を得ることが可能である。詳細は^[67-72]に譲る。また、試験体のパラメータを補うためにも用いる。数値解析に用いた材料の定数を Table 3.2.2-1 に示す。

測定に用いた EMAT を Fig. 3.2.2-1 に示す。表面磁束密度が約 0.5T の 2 つのネオジウム磁石と 80 巻のトラック状のコイルで構成されている、垂直横波用 EMAT である。測定システムを Fig. 3.2.2-2 に示す。バースト波電源に RITEC, Inc. の RPR-4000 を用い、受信信号のアナログ処理(増幅, フィルタリング)は内蔵のプリアンプ, フィルタを用いている。センサのコイルに印加するバースト波には 2MHz, 2 周期, 約 800Vpp を用いる。減肉とセンサの相対位置による減肉信号と変化を確認するため, Fig. 3.2.2-3 に示すように 1mm ピッチでセンサと減肉の相対位置を変化させ, 測定を行った。センサの移動には繰り返し位置決め精度が 0.05mm 以下の自動ステージを用いることで再現性を担保した。

Table 3.2.2-1: Sample material parameters for simulation.

| | |
|-----------|---------------------------------|
| μ_r | 1 |
| σ | $1.39 \times 10^6 [1/\Omega m]$ |
| ρ | $7.39 \times 10^3 [kg/m^3]$ |
| λ | $121.0 \times 10^9 [Pa]$ |
| G | $81.0 \times 10^9 [Pa]$ |



(a) Upper side view-magnet

(b) Downside view-coil

Fig. 3.2.2-1: Schematics of the sensor structure of the EMAT. The sensor consists of two magnets and a coil. A width of the magnets is 10 mm. The using coil is 10 mm width with 80 turns.

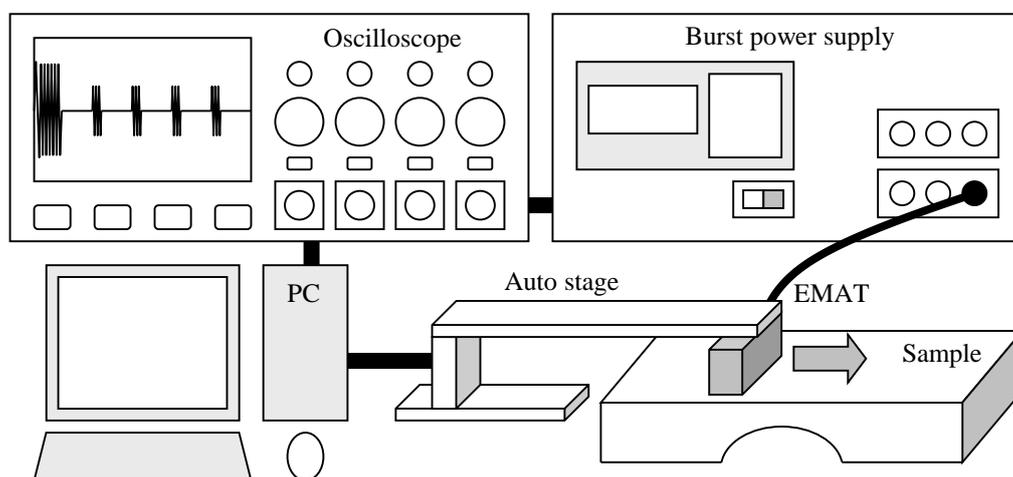


Fig. 3.2.2-2: Experimental setup for measuring thickness of a plate specimen with wall thinning. It is composed of an EMAT, a pulsar receiver (RPR-4000 RITEC Inc.), an oscilloscope, an auto stage and a computer.

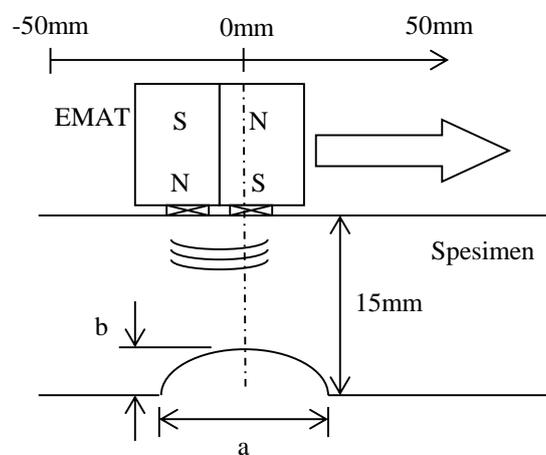


Fig. 3.2.2-3: Sketch of experiment. 'a' is width of wall thinning. 'b' is depth of wall thinning. 'c' is sensor position.

3.2.3. 測定結果

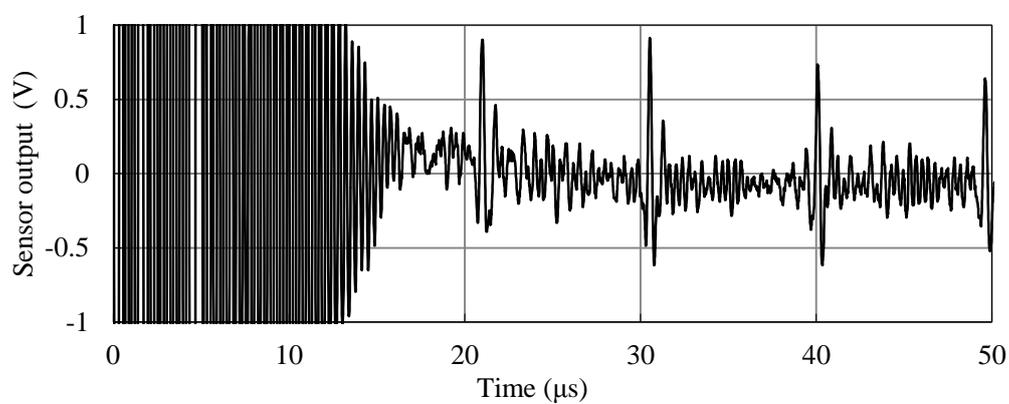
まず有限要素法による電磁場と振動の練成解析による解析コードを用いて、現象の可視化を試みた。まずは実験結果と比較することで、数値解析コードの信頼性について確認を行った。Fig. 3.2.3-1 に板厚 15mm の実験結果と数値解析結果を示す。Fig. 3.2.3-2 (a), (b) のエコー間隔が良く一致していることが確認できる。Fig. 3.2.3-2 (a) のエコー間隔は 9.28 μ s である。試験体の厚さ d (15.0mm)を反映した時間 t であるので、材料中の音速 c は以下の式で求められる。

$$c = \frac{d \times 2}{t} = \frac{15 \times 10^{-3} \times 2}{9.28 \times 10^{-6}} = 3.23 \times 10^3 [\text{m/s}] \quad (3.2.3-1)$$

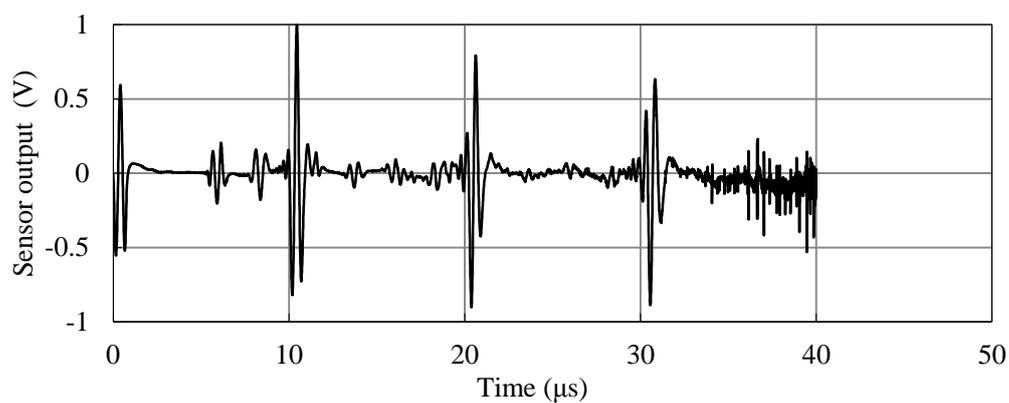
数値解析のエコー間隔は 10.1 μ s であり、同様に音速を計算すると $2.94 \times 10^3 \text{m/s}$ となる。実験から求めた音速とよく一致している。また、Table 3-1 に挙げた定数から導き出される音速 c は、次の通りである。

$$c = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{81.0 \times 10^9}{7.93 \times 10^3}} = 3.20 \times 10^3 [\text{m/s}] \quad (3.2.3-2)$$

解析コードが、試験体内部の超音波を十分模擬できていることを確認した。なお、Fig. 3.2.3-1(a)の 0~15 μ s 付近までのサチレーションは、電源由来の雑音であり、エコーを観測できるようになるには励磁を終了してから約 15 μ s かかることを意味している。これは最初のエコー-B1 が 15 μ s より早くなる場合、観測が不可能になることを意味している。今回は2番目と3番目のエコー-B2, B3 を用いてエコー間隔を評価した。



(a) Measurement result.



(b) Simulation result.

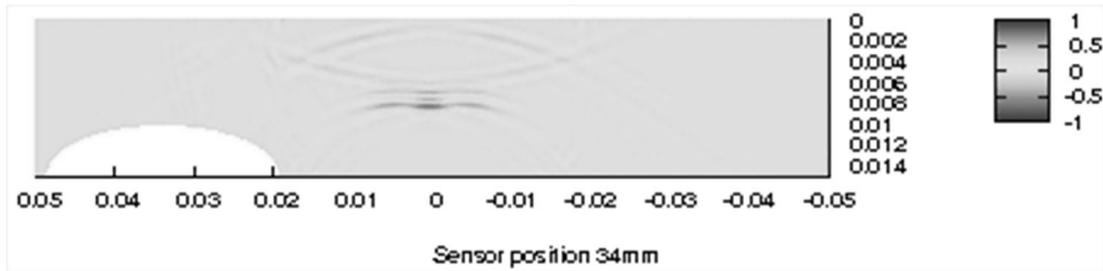
Fig. 3.2.3-1: Comparative results between measurement and simulation experiments.

The wall thickness is 15mm. Time of flight (TOF) of (a) is 9.28μs. TOF of (b) is 10.1μs.

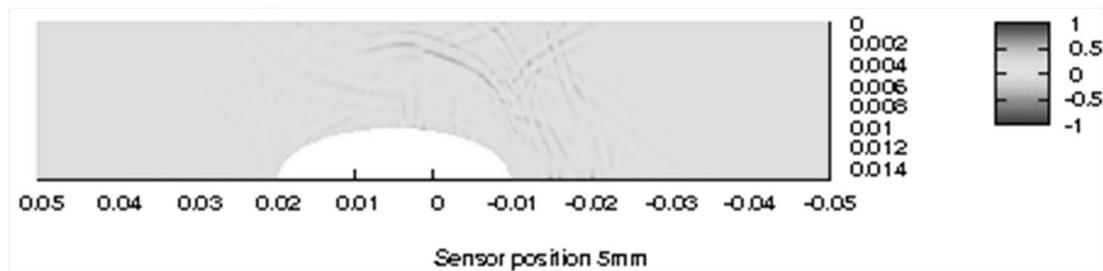
次にシミュレータを用いて超音波を可視化した結果を示す。Fig. 3.2.3-2は、超音波の横方向の変位のみを可視化している。センサは横軸 0mm の位置にその中央が存在する。センサのコイル幅は 20mm で、したがって横軸-10mm～10mm にコイルが存在している。減肉形状は幅 30mm、深さ 3mm である。

Fig. 3.2.3-2(a)は、センサが減肉から離れた位置にあるときの裏面から反射した超音波の変位を表している。超音波は横方向に一定のビーム幅(EMAT のコイル幅 20mm と同等)を持ち、裏面で反射した超音波が入射面に同時に戻ってきているのが確認できる。一方で、Fig. 3.2.3-2(b,c)では、裏面で反射した超音波が横方向に拡散しているのが確認できる。また、反射した超音波の形状が減肉形状と相似であり、超音波は、最も減肉が進んだ位置から減肉端まで、時間的な幅を持って入射面に戻ってくることが確認できる。これは受信波形のエコー振幅が減少し、さらに時間軸方向になまることを意味する。この効果は、センサのコイル幅が大きいほどその影響が大きくなることを示唆している。または、減肉が急な曲面を持つほどエコー振幅は減少する、とも言える。

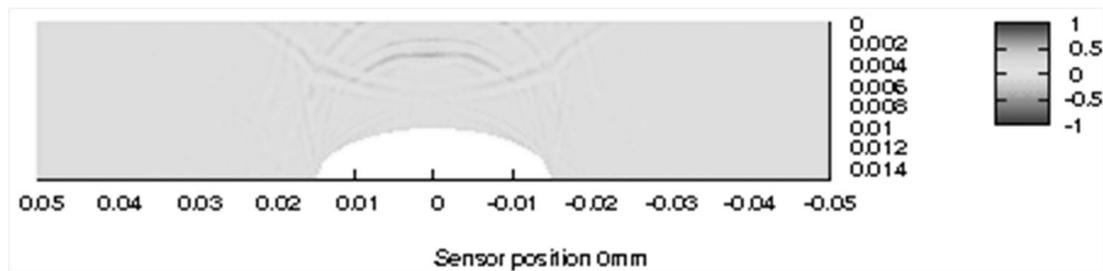
超音波が試験体表面に戻ってくる割合は減肉形状の影響を受け、用いた EMAT のように超音波のビーム幅が大きい場合、厚さ測定の可否は、特に減肉形状に依存することが明確になった。厚さ測定の可否は、減肉形状と測定系の SN 比の影響を受ける。SN 比については本シミュレーションでは考慮できないので、実験から評価する必要がある。



(a) Wave propagation with respect to the excitation outside corrosion. Sensor position is 34mm.



(b) Wave propagation with respect to the corrosion area. Sensor position is 5mm.



(c) Wave propagation with respect to the corrosion area. Sensor position is 0mm.

Fig. 3.2.3-2: Simulation results of wave propagation behavior. If the excitation of the ultrasound source is applied to the outer surface of no wall thinning area (a), the raypath of upgoing and downgoing waves can take the depth direction of plate. However, in the case where the excitation is applied to the outer surface of the corrosion area (b, c), the raypath becomes scattered to the horizontal direction.

第3章 パルスエコー法を用いた減肉の評価

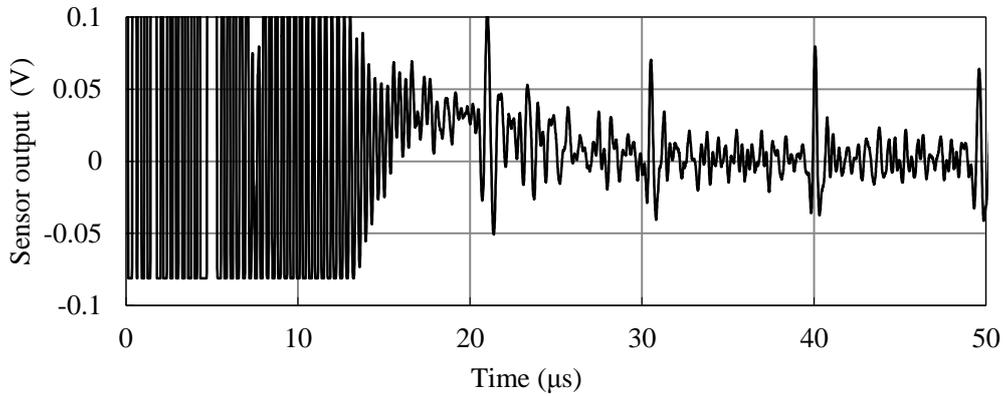
次に実験を行う。用意した平板減肉試験体を用いて測定を行った。まず、減肉に対して EMAT の相対位置を変化させた時の受信波形を示す。Fig. 3.2.3-3 は、減肉幅 30mm、減肉深さ 3mm の減肉試験体の受信波形である。Fig. 3.2.3-3 (a) は、減肉から十分離れた位置における波形である。エコー間隔から厚さ 15mm を評価できている。

Fig. 3.2.3-3(b) はセンサ中央が減肉端直上に存在する時の波形である。ここではエコーを確認することができない。減肉端は傾斜が最も大きい位置であり、EMAT が発生させる超音波の半分が拡散しているためだと考えられる。つまり、EMAT が発生させた超音波のすくなくとも 50%以上が入射面に戻ってこないと言え。十分な SN 比を確保するには、超音波の反射に寄与する面積は 50%を十分超える必要がある。

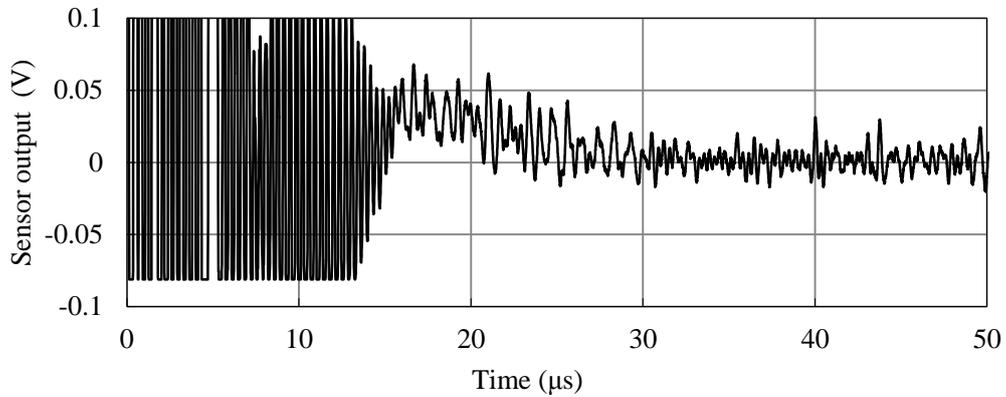
Fig. 3.2.3-3 (c) は減肉の中央にセンサが存在している時の波形である。ここでは減肉深さを評価することができるエコーが確認できた。Fig. 3.2.3-4 (c) のエコー間隔は $7.63 \mu\text{s}$ である。よって先に求めた音速から、減肉部の残肉 d は次の式で求められる。

$$d = \frac{t}{2} \times C = \frac{7.63 \times 10^{-6}}{2} \times 3.23 \times 10^3 = 12.3[\text{mm}] \quad (3.2.3-3)$$

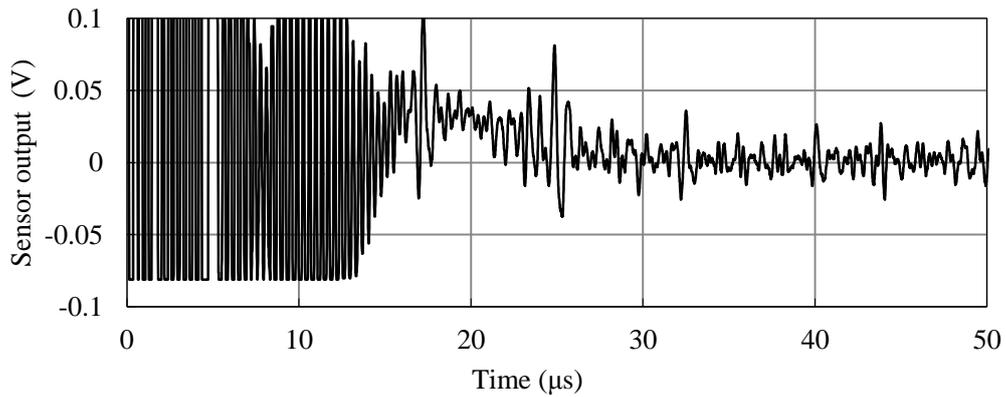
健全部の厚さは 15mm で、加工した模擬減肉の深さは 3mm であるから、エコー間隔から板厚を評価できていることが確認できる。



(a) With respect to the excitation outside corrosion. Sensor position is 20mm.



(b) With respect to the corrosion area. Sensor position is 15mm.



(c) With respect to the corrosion area. Sensor position is 0mm.

Fig. 3.2.3-3: Receiving waveform for a sample specimen with wall thinning at sensor position 0mm to 20mm. The Width of wall thinning is 10mm. The depth of wall thinning is 3mm. The Depth of wall thinning is 3mm. TOF of (a) is 9.28 μs . TOF of (c) is 7.63 μs .

第3章 パルスエコー法を用いた減肉の評価

次に実験から、減肉面の角度とエコー振幅について検討を行う。各測定点における受信信号を用いて、B scope 画像を得た。Fig. 3.2.3-4 に減肉幅 a が 10, 20, 30mm, 減肉深さ b が 3mm の B scope 画像を示す。横軸はセンサと減肉の相対位置, 縦軸は発振からの時間である。エコーの絶対値をグレースケールで表している。センサ位置 0mm は減肉の頂点であり, それぞれにおいて残肉を評価しているエコーが確認できる。しかし, センサ位置が減肉の傾斜部に存在するとき, エコーは確認できない。同様に, Fig. 3.2.3-5 は減肉幅 a が 10, 20, 30mm, 減肉深さ b が 5mm の B scope 画像であるが, 減肉頂点であるセンサ位置 0mm でエコーを確認できるのは減肉幅 a が 30mm だけであった。また, Fig. 3.2.3-6 は減肉幅 a が 10, 20, 30mm, 減肉深さ b が 10mm の B scope 画像であるが, すべての試験体において減肉部のエコーが確認できない。Fig. 3.2.3-4~6 で得られたセンサ位置 0mm の結果を, Table 3.2.3-1 のようにまとめた。

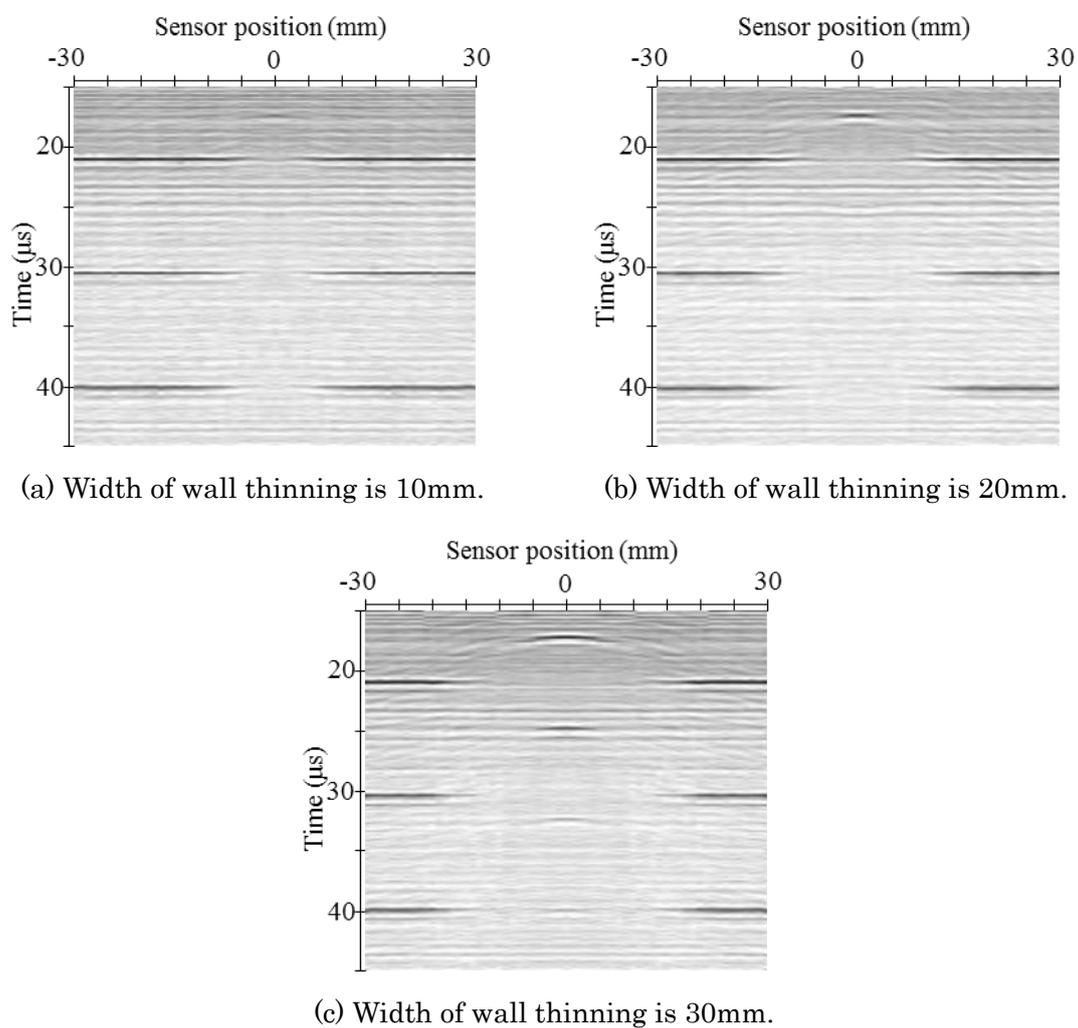


Fig. 3.2.3-4: B scope results for sample specimens with wall thinning. Depth of wall thinning of sample specimens is 3mm. TOF of (a, b, c) is 9.28μs at corrosion's center.

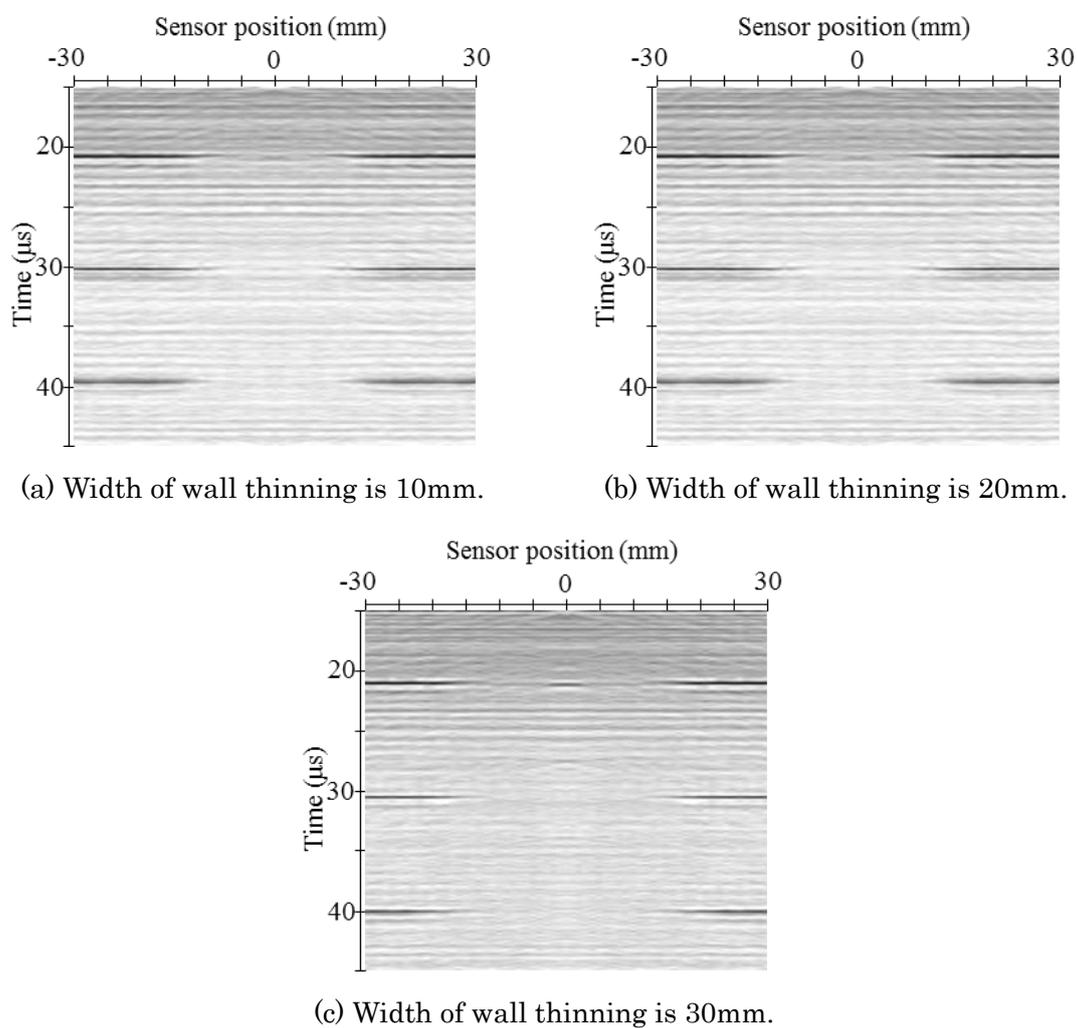


Fig. 3.2.3-5: B scope results for sample specimens with wall thinning. The depth of wall thinning of sample specimens is 5mm. TOF of (c) is 7.63μs at corrosion's center.

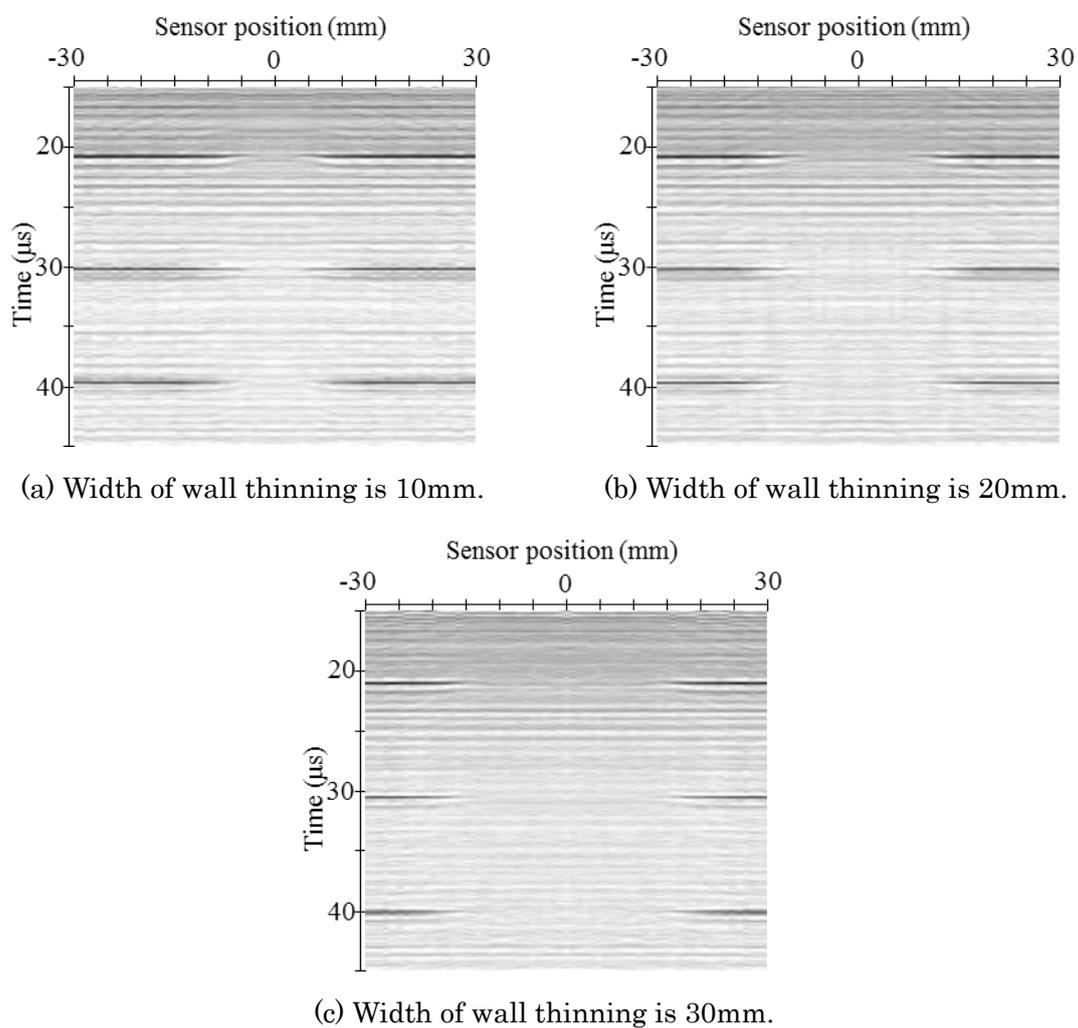
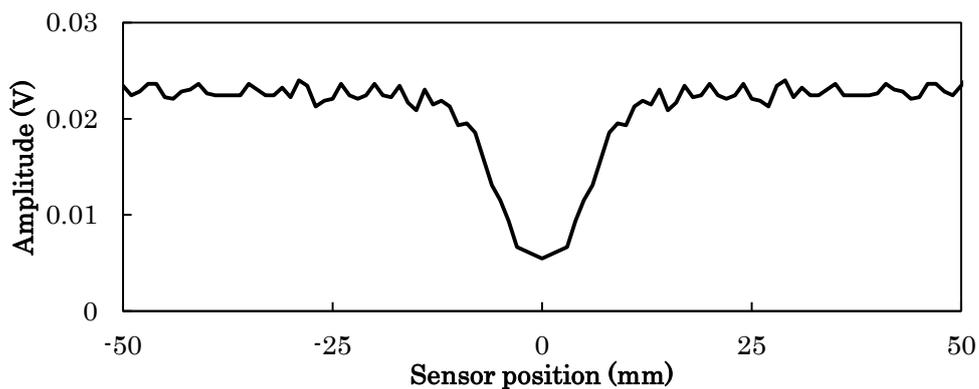


Fig. 3.2.3-6: B scope results for sample specimens with wall thinning. Depth of wall thinning of sample specimens is 10mm. TOF of all results can't be detected at corrosion area.

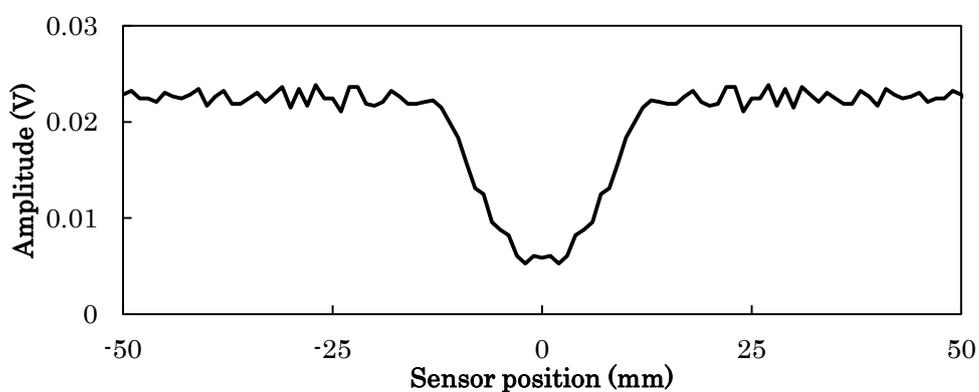
Table 3.2.3-1: Measurement results for sample specimens with a mock-up corrosion.

| Wall thinning | | Time of flight (μs) | Depth of wall thinning by TOF (mm) |
|---------------|------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Width (mm) | Depth (mm) | | |
| 10 | 3 | - | - |
| 20 | 3 | - | - |
| 30 | 3 | - | - |
| 10 | 5 | 7.63 | 2.70 |
| 20 | 5 | - | - |
| 30 | 5 | - | - |
| 10 | 10 | 7.63 | 2.70 |
| 20 | 10 | 6.42 | 4.66 |
| 30 | 10 | - | - |

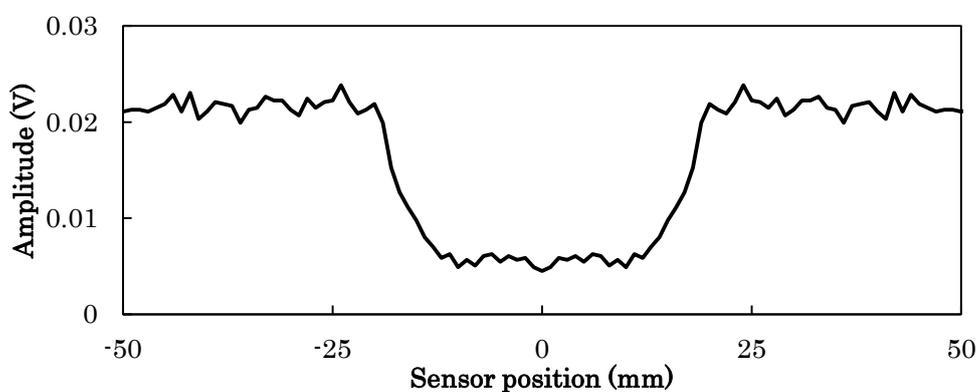
次に、減肉幅の復元を試みる。各センサ位置を横軸に、健全部の2回目の底面エコーが検出できる20~22 μ sのエコー振幅を縦軸にしたグラフをFig. 3.2.3-7~9に示す。各試験体ともに、センサ端と減肉が重なるセンサ位置(例えばFig. 3.2.3-7ではセンサ位置15mm)付近から、急激なエコー振幅の変化があることが見て取れる。これを利用することで、エコーの有無により減肉幅を評価する手法を提案する。センサ端と減肉が重なるセンサ位置(a+5mm)と、その位置から減肉側に1mmの位置における底面エコーを、健全部の底面エコーで正規化した。その結果をTable 3.2.3-2に示す。センサ端と減肉端では、1mmずれるだけで信号振幅は10~15%減衰する。これにより、使用したセンサと試験体の組み合わせにおいては、エコー高さが健全部の75.9%で、センサ端が減肉に重なると言える。



(a) Width of wall thinning is 10mm.

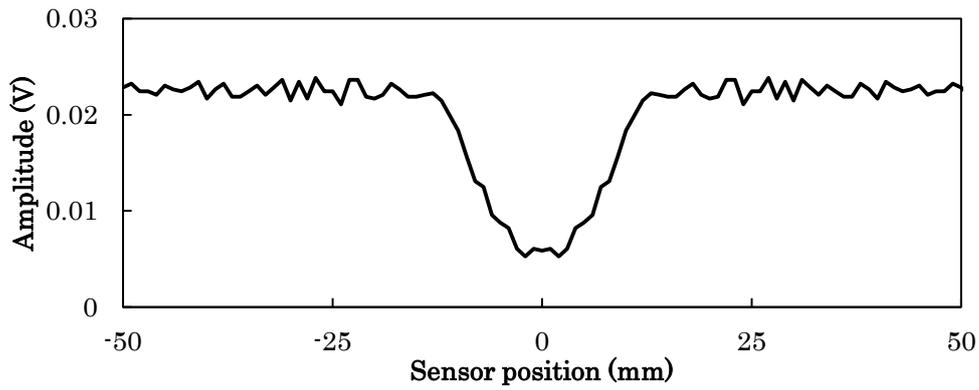


(b) Width of wall thinning is 20mm.

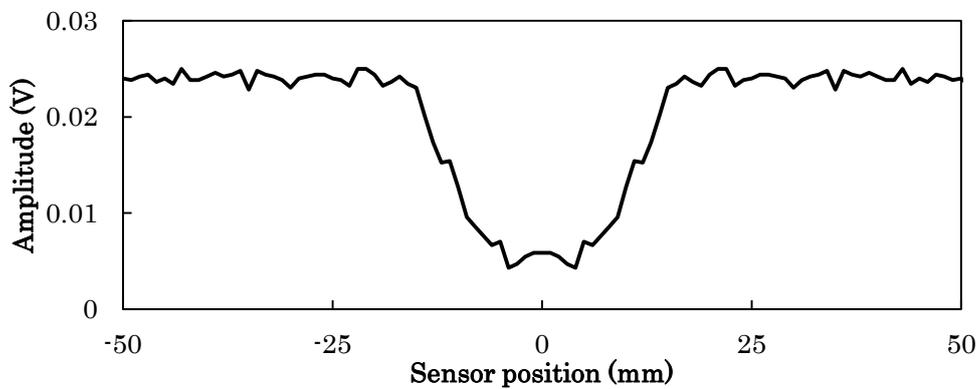


(c) Width of wall thinning is 30mm.

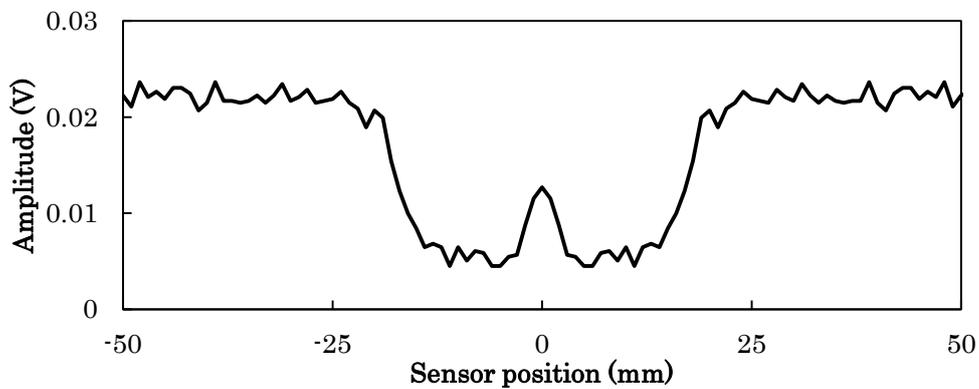
Fig. 3.2.3-7: Amplitude of Sensor output at 20 μ s. The Depth of wall thinning of sample specimens is 3mm.



(a) Width of wall thinning is 10mm

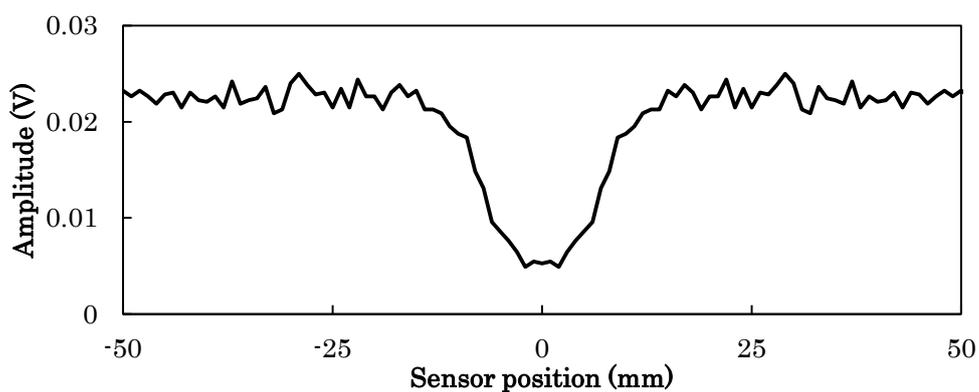


(b) Width of wall thinning is 20mm

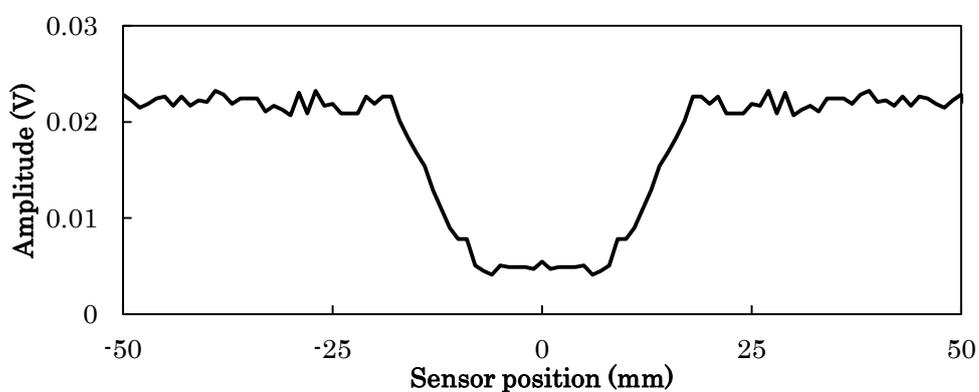


(c) Width of wall thinning is 30mm

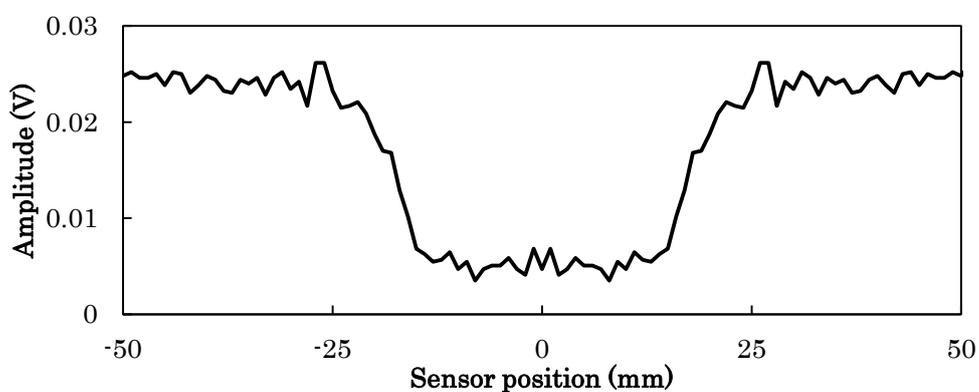
Fig. 3.2.3-8: Amplitude of Sensor output at 20 μ s. The Depth of wall thinning of sample specimens is 5mm.



(a) Width of wall thinning is 10mm



(b) Width of wall thinning is 20mm



(c) Width of wall thinning is 30mm

Fig. 3.2.3-9: Amplitude of Sensor output at 20 μ s. The Depth of wall thinning of sample specimens is 10mm.

Table 3.2.3-2: Reduction rate and echo amplitude.

| Wall thinning | | Reduction rate | | |
|---------------|------------|----------------|-------------|-------------|
| Width (mm) | Depth (mm) | Width + 4mm | Width + 5mm | Width + 6mm |
| 10 | 3 | 0.547 | 0.782 | 0.873 |
| 20 | 3 | 0.639 | 0.743 | 0.839 |
| 30 | 3 | 0.545 | 0.701 | 0.847 |
| 10 | 5 | 0.622 | 0.785 | 0.867 |
| 20 | 5 | 0.605 | 0.773 | 0.817 |
| 30 | 5 | 0.566 | 0.743 | 0.864 |
| 10 | 10 | 0.638 | 0.797 | 0.854 |
| 20 | 10 | 0.587 | 0.776 | 0.847 |
| 30 | 10 | 0.570 | 0.728 | 0.849 |
| Average | | 0.591 | 0.759 | 0.851 |

これまでの検討によって、減肉面の角度が受信信号に与える影響が大きいことを確認できた。そこで、Fig. 3.2.1-1 に示す減肉幅 a および減肉深さ b を用いて、減肉面の角度を表すパラメータ K を設定した。

$$K = \frac{b}{a} \quad (3.2.3-3)$$

K に着目して、減肉中央部でのエコー振幅の測定の可否についてまとめた結果を Table 3.2.3-3 に示す。減肉幅に応じて測定可能な K の値が異なっていることが確認できる。しかし実験のみでは K の値を十分とることができないので、開発したシミュレータを用いて、その補完を試みた。減肉幅 a を 10, 15, 20, 25, 30mm の 5 種類、減肉深さ b を 0~13mm までの 1mm ピッチ 14 種類をとり、 K の値が十分細かくなるようパラメータを設定した。数値解析で求めた値は実験から得られた値で正規化し、実験における雑音の V_{pp} を考慮したうえで、エコーの測定の可否を判断した。まとめた結果を Fig. 3.2.3-10 に示す。横軸に減肉幅 a を取り、縦軸に K の最大値 K_{max} を取った。減肉幅によって測定可能な K_{max} の値が異なり、 K_{max} が指数関数的な変化をしているのが確認できる。実線は最小二乗法で求めた近似曲線である。超音波の入射面に対する減肉面の角度が小さくなることで、減肉面で拡散する超音波が指数的に減衰しており、本節で確認してきた超音波の反射の傾向を裏付けている。

減肉深さはエコー間隔から、減肉幅はエコー振幅に着目することで、測定可能であることを確認した。さらに減肉形状における K の値によって、減肉深さが測定できない、逆に言うと、減肉深さが測定できない場合は、その場所にはより深い減肉が存在すると言える。これを利用した減肉形状寸化法を提案する。フローチャートを Fig. 3.2.3-11 に示す。本手法は、センサ位置プロファイルから、エコー振幅が、健全部の 76% になっている箇所から減肉幅を推定する。次に減肉部におけるエコー間隔から減肉深さを推定する。減肉部でのエコーが測定できない場合は、先に求めた K_{max} 以上の減肉が存在すると推定する。

Table 3.2.3-3: K and S/N

| | | Wall thinning shape | | |
|----|-----|---------------------|------------|------|
| | | Width (mm) | Depth (mm) | |
| | | 3 | 5 | 10 |
| 10 | K | 0.3 | 0.5 | 1.0 |
| | S/N | - | - | - |
| 20 | K | 0.15 | 0.25 | 0.5 |
| | S/N | 1.71 | 1.22 | - |
| 30 | K | 0.1 | 0.17 | 0.75 |
| | S/N | 2.06 | 1.51 | - |

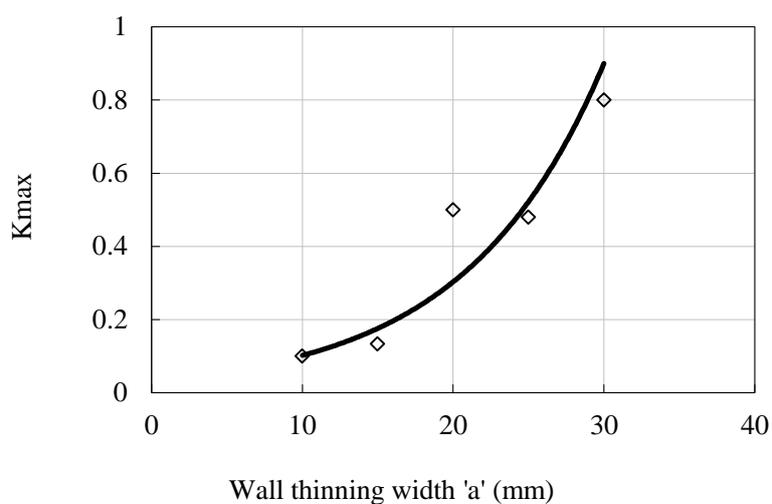


Fig. 3.2.3-10: Normalized Max value of K (K_{max}) versus width of wall thinning (a). (•) Experimental samples. (—) least squares method.

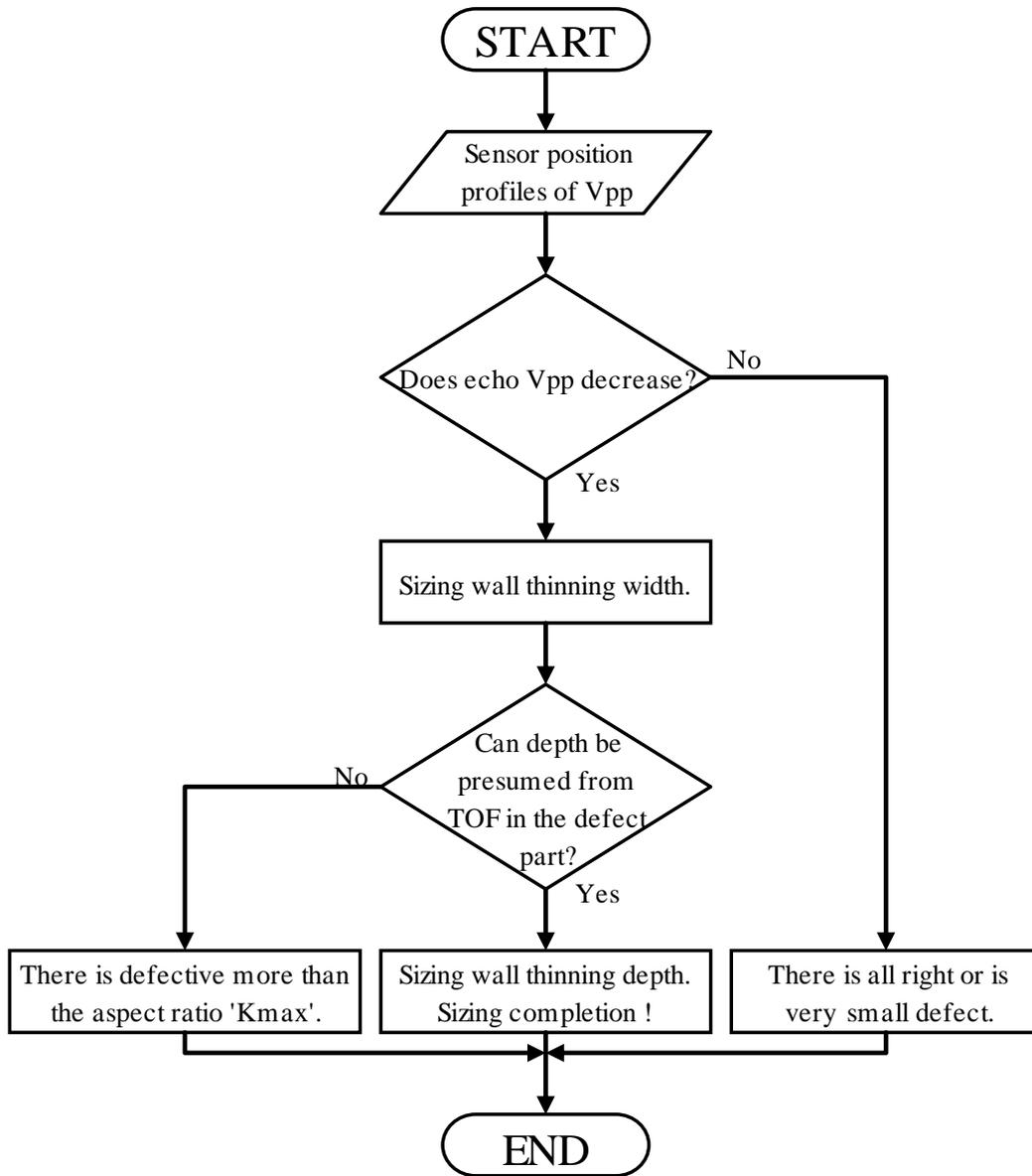
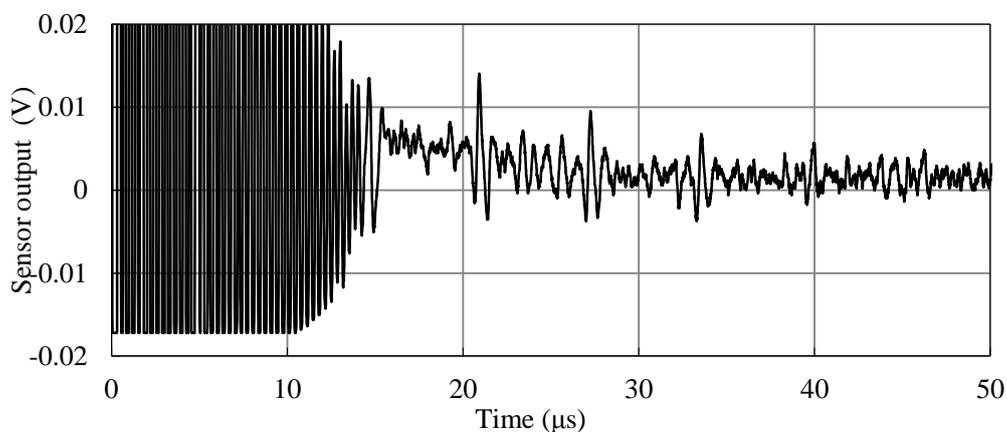
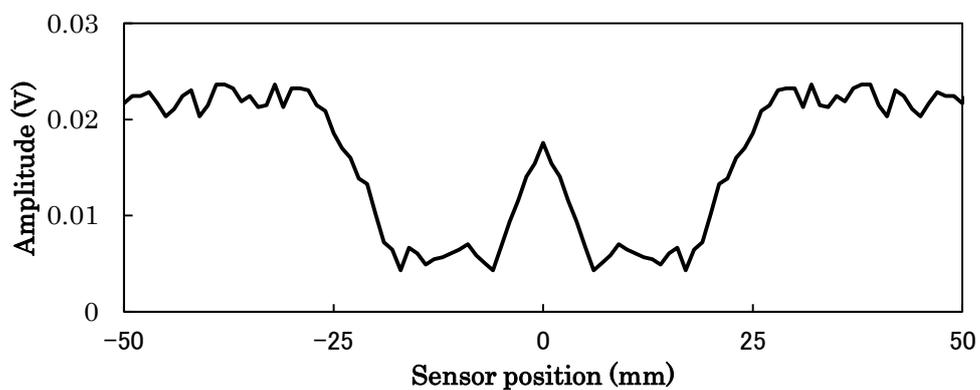


Fig. 3.2.3-11: Flowchart for wall thinning diagnosis.

提案したフローチャートに基づき、減肉幅 40mm、減肉深さ 5mm の試験体における減肉形状の寸法化を試みた。測定結果を Fig. 3.2.3-12 に示す。Fig. 3.2.3-12(a) からエコー間隔が測定可能であり、減肉深さが推定可能である。また Fig. 3.2.3-12 (b)のセンサ位置プロファイルから、エコー振幅が健全部の 76%になったセンサ位置、また減肉端とセンサ端が減肉幅、の減肉形状の寸法化結果を Table 3.2.3-4 に示す。



(a) Receiving waveform at sensor position is 0mm.



(b) Amplitude of sensor output at sensor position.

Fig. 3.2.3-12: Measurement results of (a=20, b=5):

Table 3.2.3-4: Diagnosis wall thinning.

| Wall thinning shape | Wall thinning (mm) | Diagnosis wall thinning (mm) | Error (%) |
|---------------------|--------------------|------------------------------|-----------|
| Width | 40.00 | 46.0 | 15 |
| Depth | 5.00 | 4.8 | -4 |

3.3. 配管模擬減肉試験体への適用

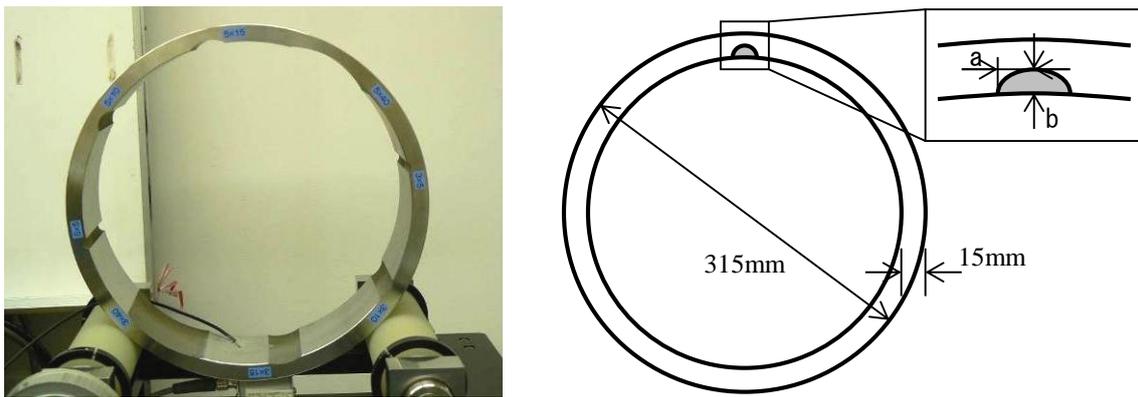
3.3.1. 試験体

平板の実験は予備実験であり、容易であると思われる比較的深い減肉を持つ試験体を用いていた。減肉端などの超音波の反射面の角度が大きい部分では反射波をとらえることが難しかったが、減肉の形状を推定することが可能であった。実際の配管は入射面、反射面ともに R を持っている。これは超音波強度の減衰が予想される。実際の配管で確認することが重要であり、本節では配管に部分減肉を加工し、平板と同様の実験を行った。

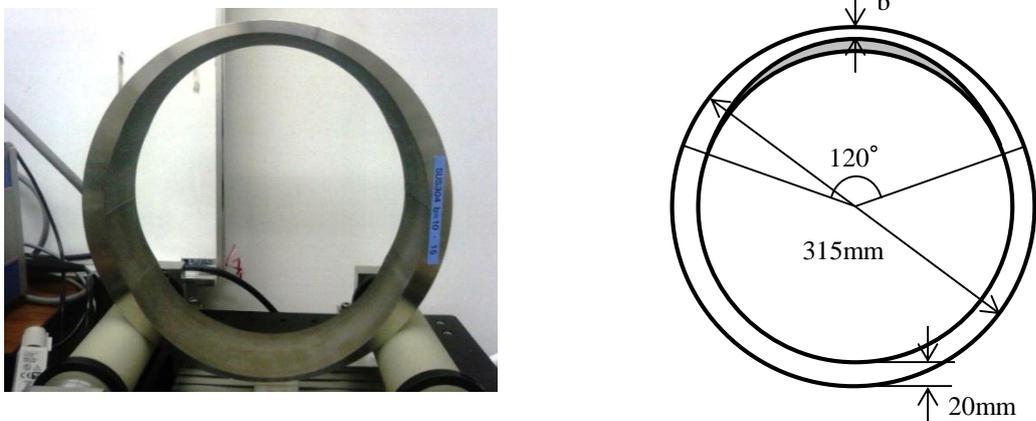
実験に用いた配管は、外径 315mm(呼び径 300A)である。材質は平板と同様に SUS304 を用いた。これに放電加工によって Fig. 3.3.1-1 に示す 3 種類の減肉試験体を作成した。

Fig. 3.3.1-1(a) は前節と同じ半楕円減肉を配管に加工したものである。減肉幅 a が減肉深さ b より大きいとき、FAC モデルとした。逆に減肉深さ b が減肉幅 a より大きいとき、その減肉は LDI モデルとした。減肉幅 a は 4, 10, 15, 40mm, 減肉深さ b は 3, 5mm とし、1 つの試験体に 8 つの減肉を加工している。健全部の厚さは 15mm である。Fig. 3.3.1-1(b), (c) はより広範囲に生じる FAC を表現している。これらの健全部の厚さは 20mm である。

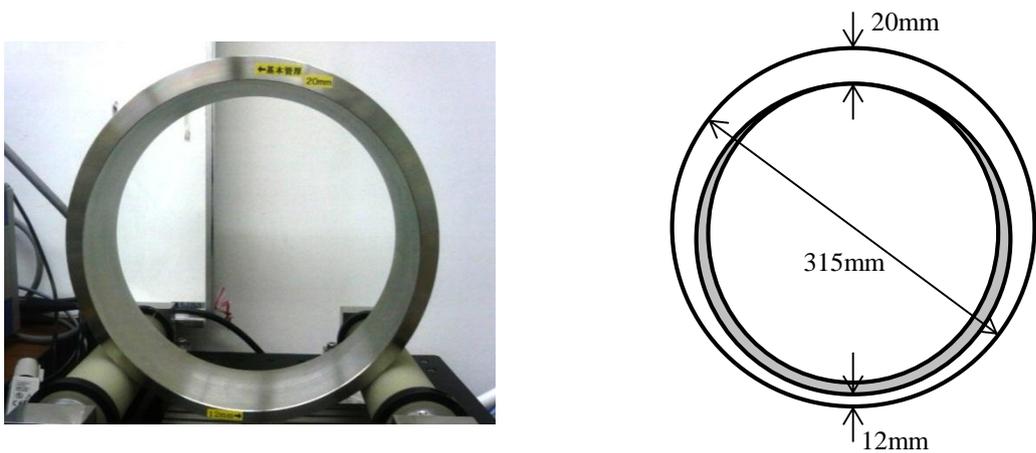
Fig. 3.3.1-1(b) は減肉形状を半楕円ではなく、実際の減肉により近い円弧とした。減肉深さ b は 3, 5, 10, 15mm とし、1 体の試験体に 2 つの減肉を加工している。Fig. 3.3.1-1(c) は全周にわたって減肉している配管を模擬した。



(a) Narrow partial thinning



(b) Wide partial thinning



(c) Full circumferential thinning

Fig. 3.3.1-1: Sample specimens for pipe wall thinning model.

3.3.2. 測定方法

Fig. 3.3.2-1 に実験装置を示す。EMAT, 電源, オシロスコープ, 自動ステージで構成される。EMAT には電源によって, Fig. 3.2.2-3 に示した約 800Vpp, 2MHz, 2 周期のバースト波を印可している。反射波はオシロスコープと接続されたコンピュータで記録する。配管はセンサに対して任意の角度で自動ステージを用いて回転させることができ, ここでは 1mm ピッチで試験体表面をスキャンするように配管を回転させた。これにより, EMAT で超音波の反射面からのプロファイルを測定する。Fig. 3.3.2-2 に, 使用した EMAT の外観を示す。部材は 3.2 節の EMAT と同じだが, コイル面が曲面に合うように, 部材を配置している。

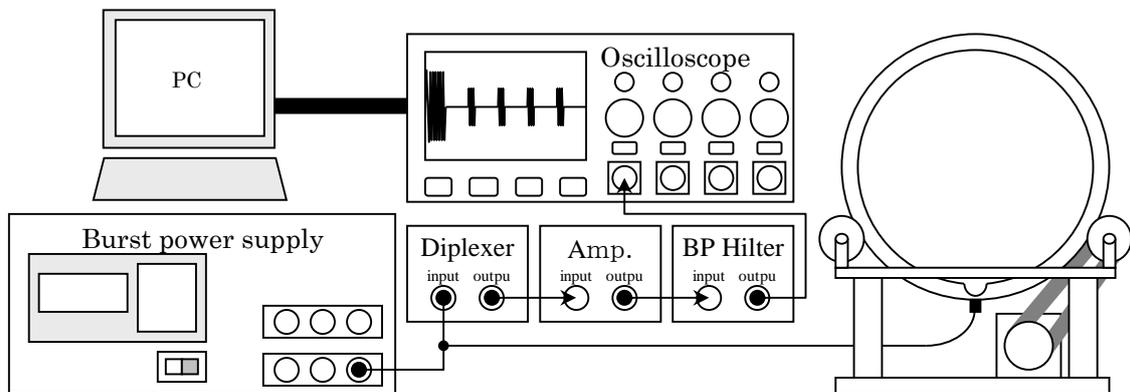


Fig. 3.3.2-1: Experimental setup for measuring thickness of a pipe specimen with wall thinning. It is composed of EMAT, a pulsar receiver, an oscilloscope, an auto stage and a computer. The reflective waveforms are recorded by a computer coupled to an oscilloscope. The sensor is scanned with 1mm pitch on the front surface as illustrated by an auto stage. We investigate the features of the reflected waveform profiles from the bottom surface by EMAT.

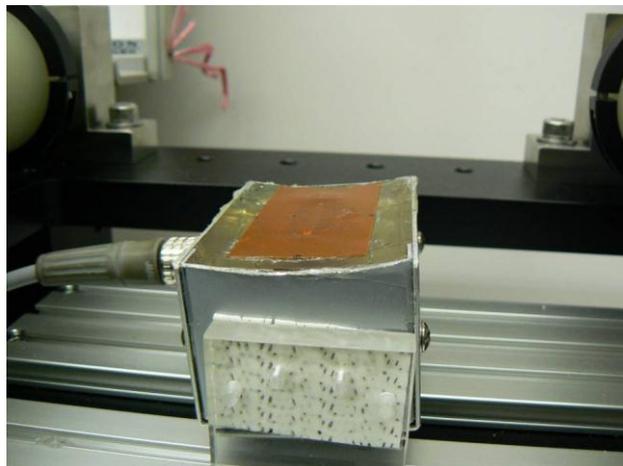


Fig. 3.3.2-2: Photograph of EMAT. The structures of the EMAT and fig. 3.2.2-1 are the same. The EMAT has a curved surface.

3.3.3. 測定結果

最初に、Fig. 3.3.1-1(a)の試験体の測定結果について説明する。Fig. 3.3.3-1～8 は各試験体の検出波形を示している。Fig. 3.3.3-1 (a) は減肉がない位置の波形である。Fig. 3.3.2-3(a) から、SH 波による TOF は $9.53\mu\text{s}$ であった。この試験体において、減肉がない箇所の厚さは 15mm である。したがって音速は以下のように得られる。

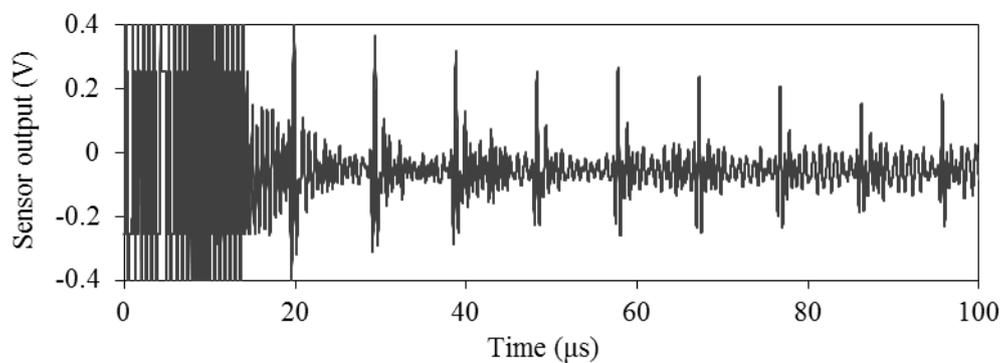
$$C = \frac{d \times 2}{t} = \frac{15.0 \times 10^{-3} \times 2}{9.53 \times 10^{-6}} = 3.15 \times 10^3 [\text{m/s}] \quad (3.3.3-1)$$

しがしながら Fig. 3.3.3-1(b)の測定結果からは TOF は測定できない。これはセンサの有効面積の半分が減肉端と重なっているときの測定結果である。減肉端は最も反射面が急峻なところであり、超音波が反射面で拡散していると思われる。なお、 $22, 42\mu\text{s}$ 付近に見える信号は、EMAT の磁石内部に生じる超音波に起因する信号である。Fig. 3.3.3-1(c) は減肉中央部の測定波形である。この波形の TOF は $7.63\mu\text{s}$ で、その厚さを計算すると、以下のようになる。

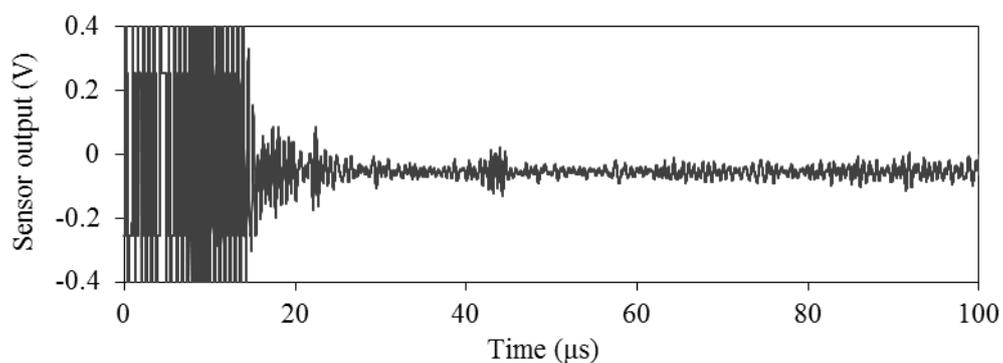
$$d = \frac{t}{2} \times C = \frac{7.63 \times 10^{-6}}{2} \times 3.15 \times 10^3 = 12.0 [\text{mm}] \quad (3.3.3-2)$$

健全部の厚さは 15mm であり、減肉深さ $b = 3\text{mm}$ となり、ゆえに残肉 d は 12mm となる。測定された結果は配管の厚さに等しい。同様に、Fig. 3.3.3-1～4 までは減肉中央で最少残肉に対応するエコーを確認できた。一方で、Fig. 3.3.3.5～8 からわかるように、減肉幅 a が小さくなると減肉部ではエコーは観測できない。超音波の反射面(減肉面)がセンサの限界を超えて急峻になっていると思われる。

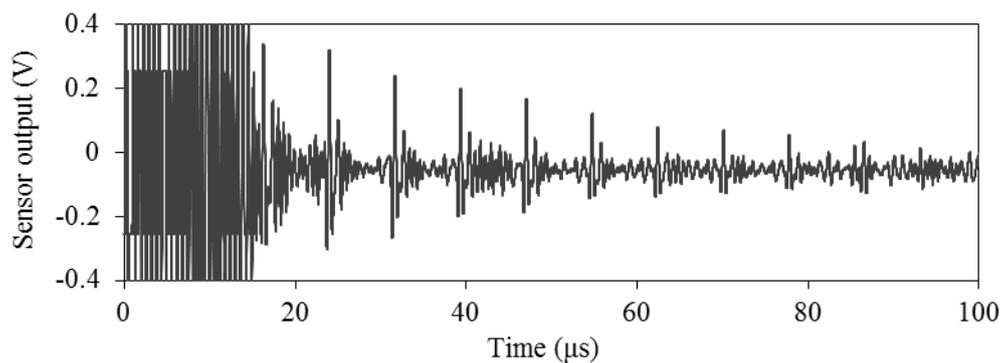
減肉面が急峻になる成長した LDI のような減肉は、EMAT での測定が難しくなっている。圧電素子型のセンサでも同様な傾向ではあるが、センサ面積が大きい EMAT の場合、その傾向が顕著であることが確認できた。残肉の測定を実機に適用するには、センサ面積と測定可能な反射面について明らかにしておく必要がある。次に減肉幅について検討する。



(a) With respect to the excitation outside corrosion.

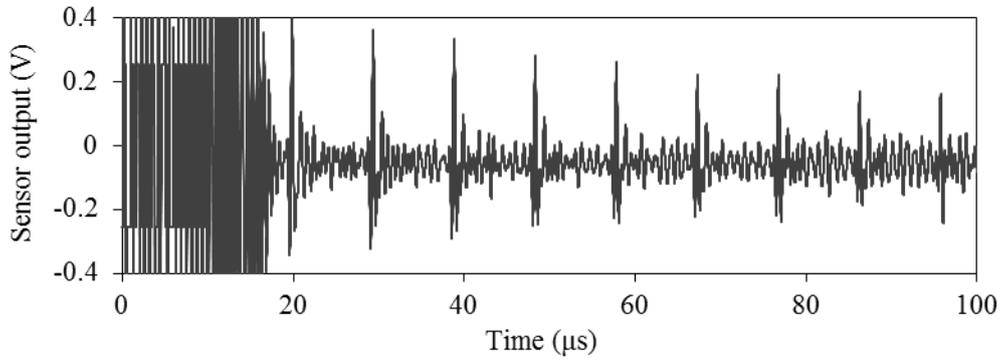


(b) Sensor position = 40mm

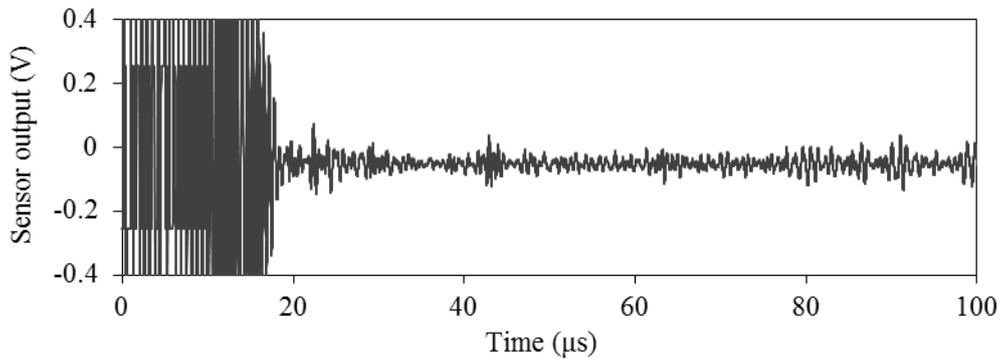


(c) With respect to the corrosion area. Sensor position is 0mm.

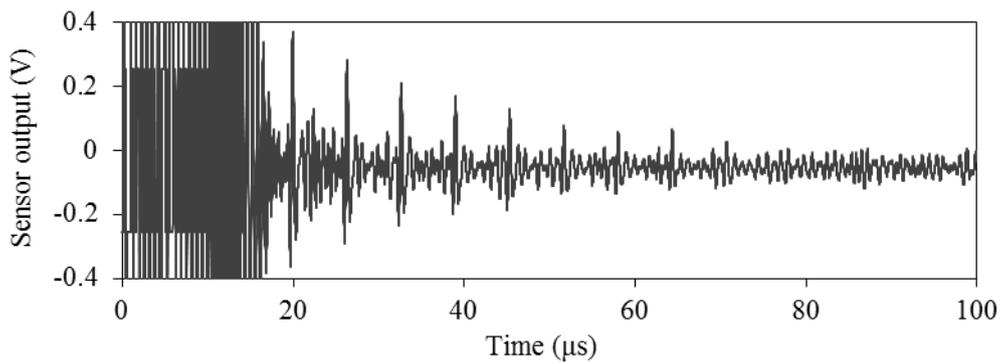
Fig. 3.3.3-1: Receiving waveform of a sample specimen with wall thinning. The Width of wall thinning is 80mm. The depth of wall thinning is 3mm.



(a) With respect to the excitation outside corrosion.

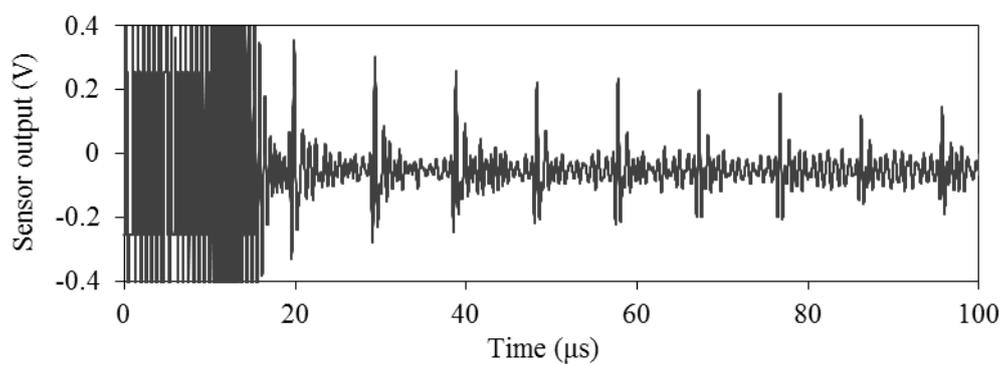


(b) With respect to the corrosion area. Sensor position is 40mm.

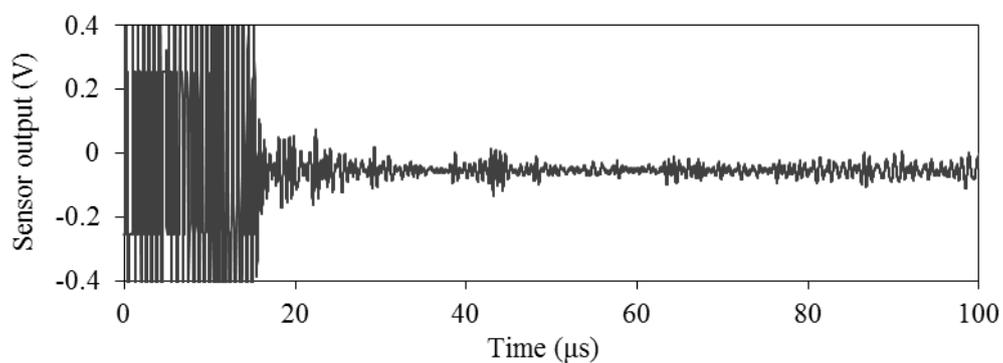


(c) With respect to the corrosion area. Sensor position is 0mm.

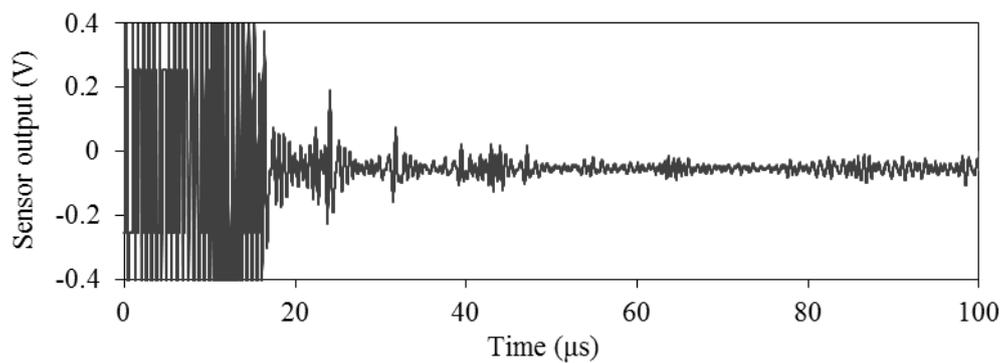
Fig. 3.3.3-2: Receiving waveform of a sample specimen with wall thinning. The Width of wall thinning is 80mm. The depth of wall thinning is 5mm.



(a) With respect to the excitation outside corrosion.

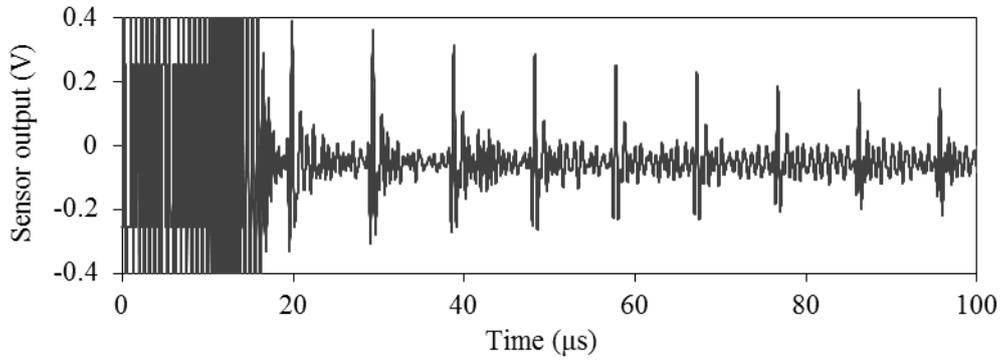


(b) With respect to the corrosion area. Sensor position is 15mm.

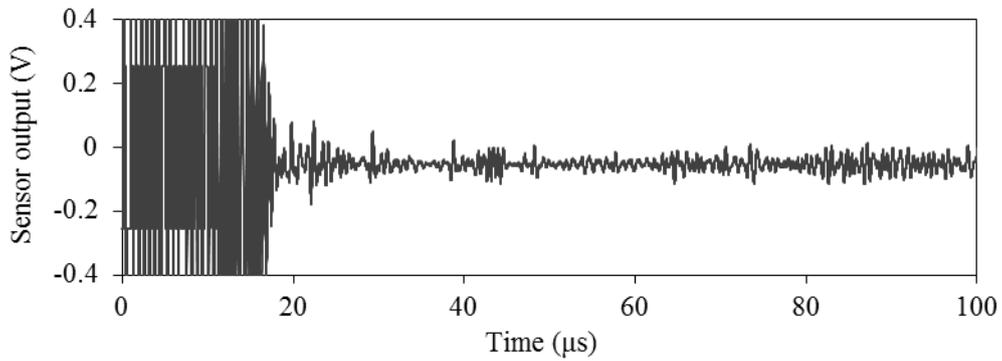


(c) With respect to the corrosion area. Sensor position is 0mm.

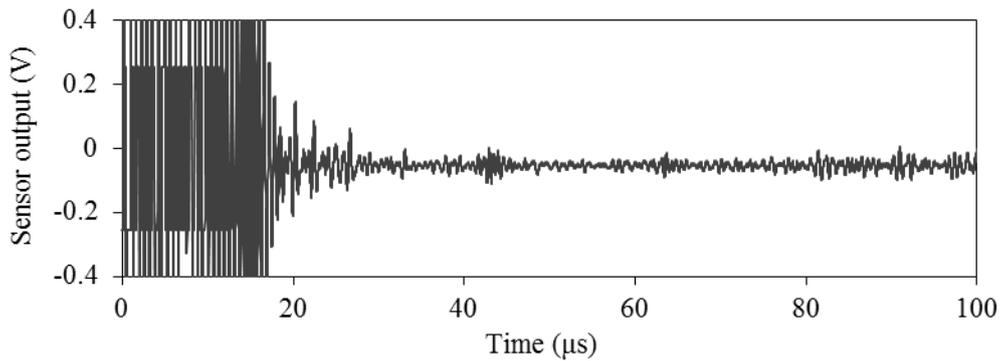
Fig. 3.3.3-3: Receiving waveform of a sample specimen with wall thinning. The Width of wall thinning is 30mm. The depth of wall thinning is 3mm.



(a) With respect to the excitation outside corrosion.

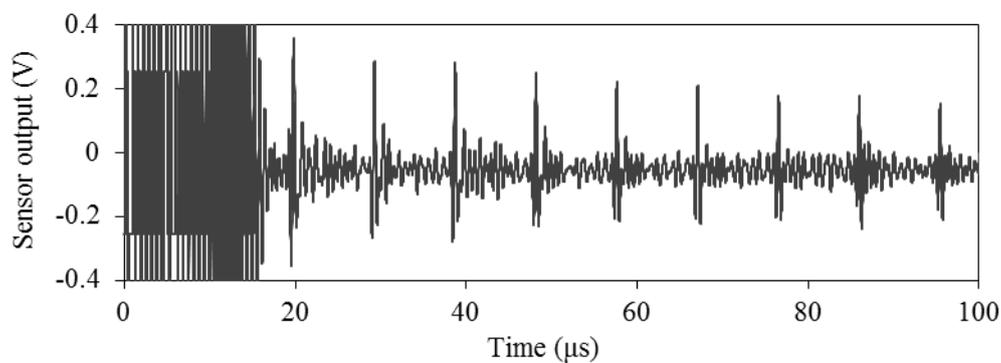


(b) With respect to the corrosion area. Sensor position is 15mm.

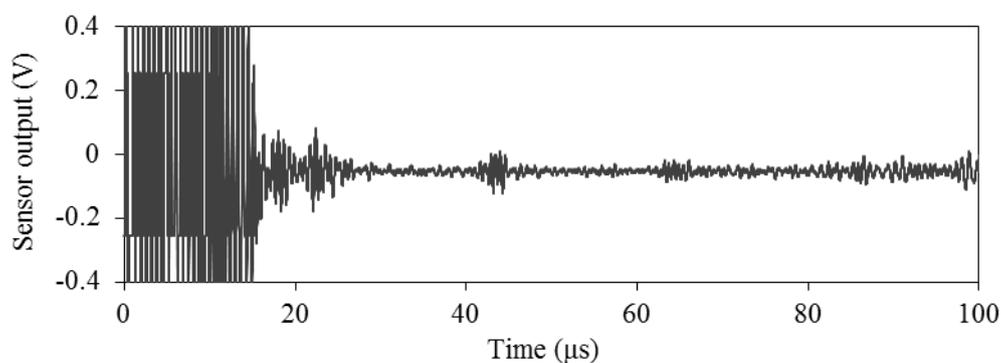


(c) With respect to the corrosion area. Sensor position is 0mm.

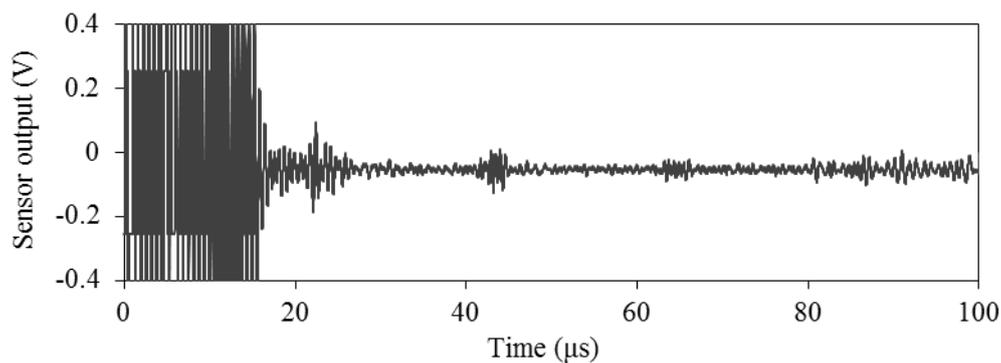
Fig. 3.3.3-4: Receiving waveform of a sample specimen with wall thinning. The Width of wall thinning is 30mm. The depth of wall thinning is 5mm.



(a) With respect to the excitation outside corrosion.

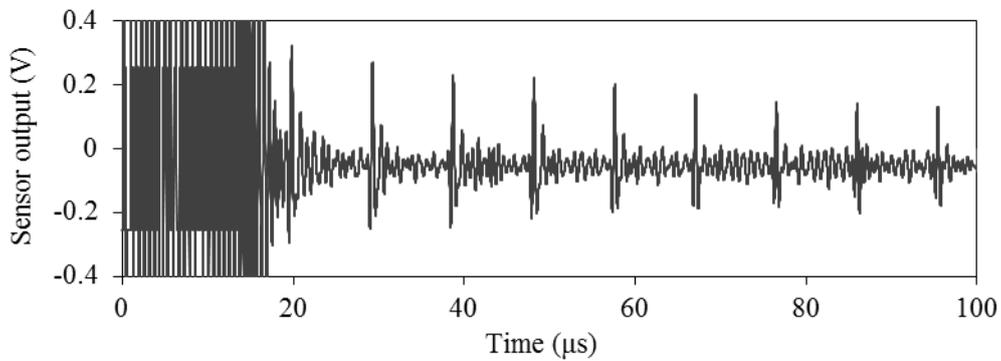


(b) With respect to the corrosion area. Sensor position is 10mm.

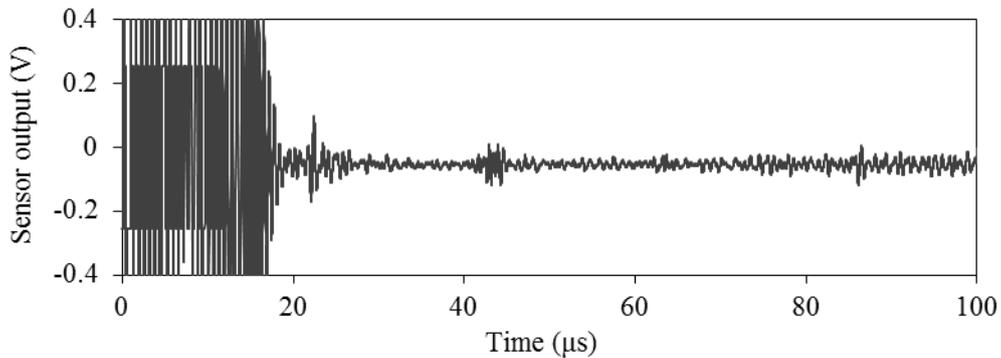


(c) With respect to the corrosion area. Sensor position is 0mm.

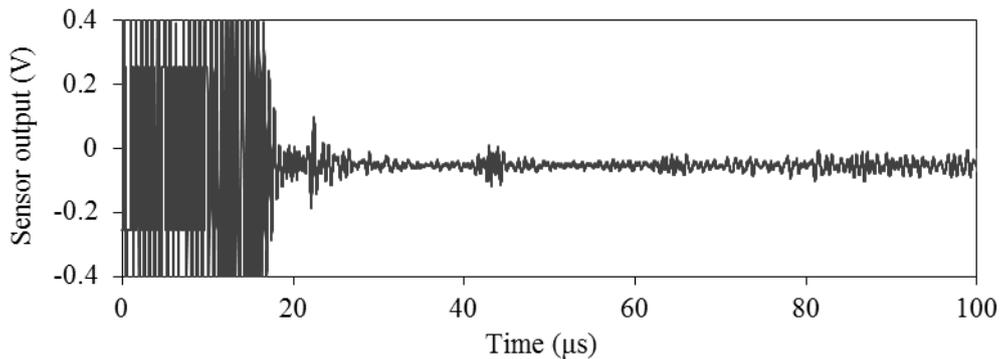
Fig. 3.3.3-5: Receiving waveform of a sample specimen with wall thinning. The Width of wall thinning is 20mm. The depth of wall thinning is 3mm.



(a) With respect to the excitation outside corrosion.

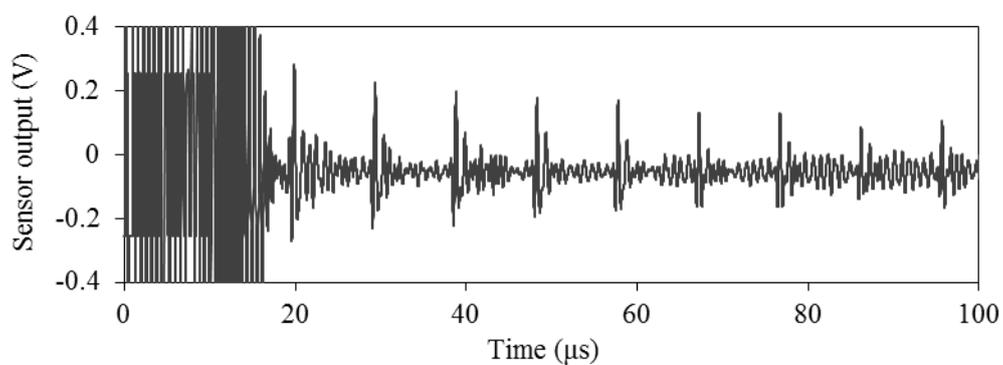


(b) With respect to the corrosion area. Sensor position is 10mm.

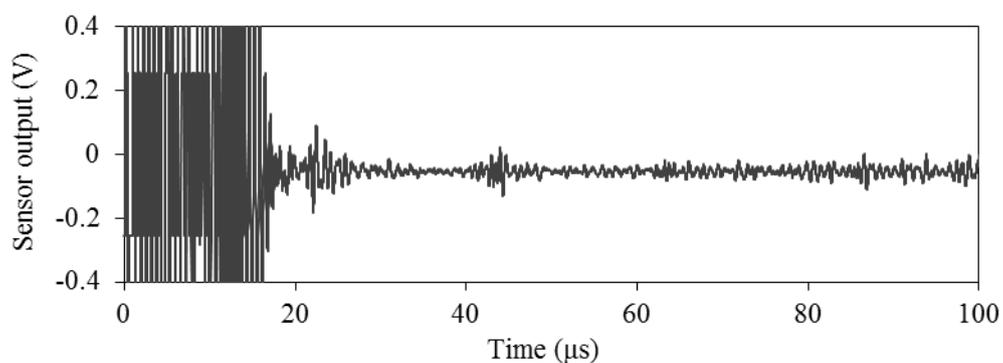


(c) With respect to the corrosion area. Sensor position is 0mm.

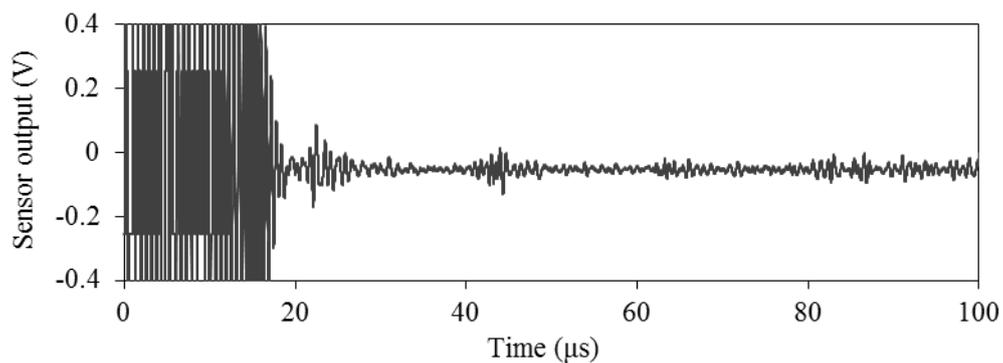
Fig. 3.3.3-6: Receiving waveform of a sample specimen with wall thinning. The Width of wall thinning is 20mm. The depth of wall thinning is 5mm.



(a) With respect to the excitation outside corrosion.

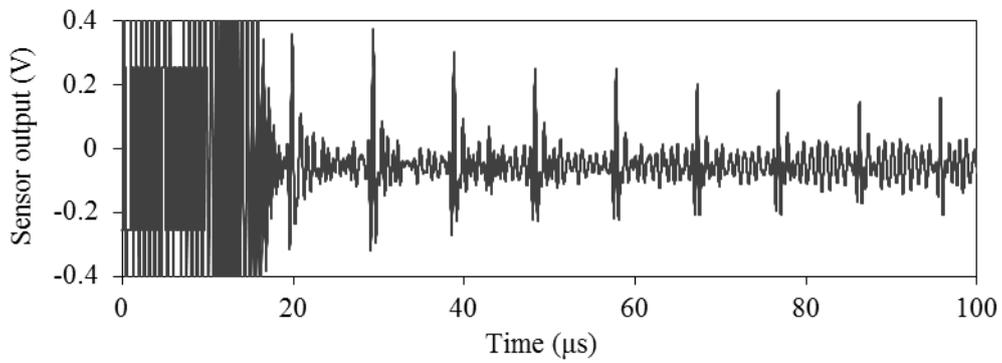


(b) With respect to the corrosion area. Sensor position is 10mm.

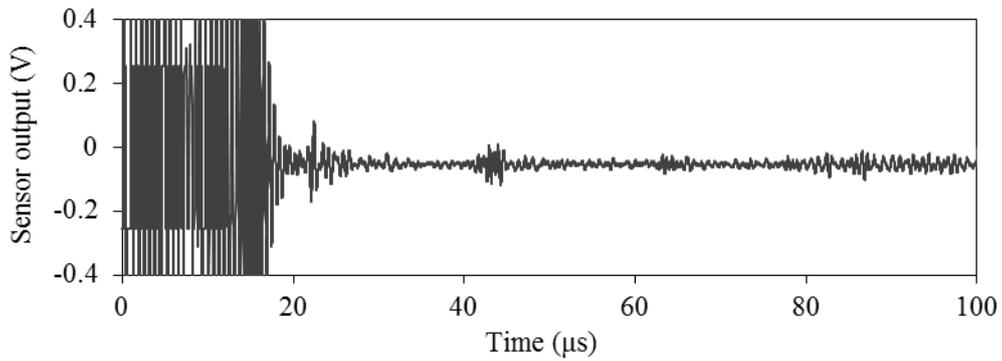


(c) With respect to the corrosion area. Sensor position is 0mm.

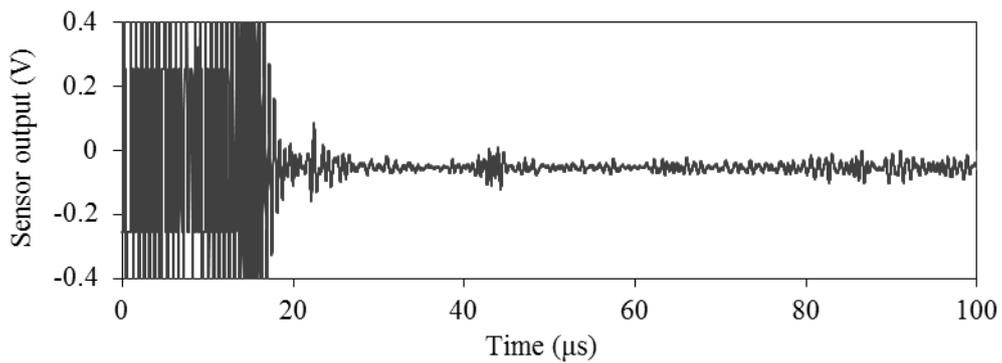
Fig. 3.3.3-7: Receiving waveform of a sample specimen with wall thinning. The Width of wall thinning is 10mm. The depth of wall thinning is 3mm.



(a) With respect to the excitation outside corrosion.



(b) With respect to the corrosion area. Sensor position is 40mm.



(c) With respect to the corrosion area. Sensor position is 0mm.

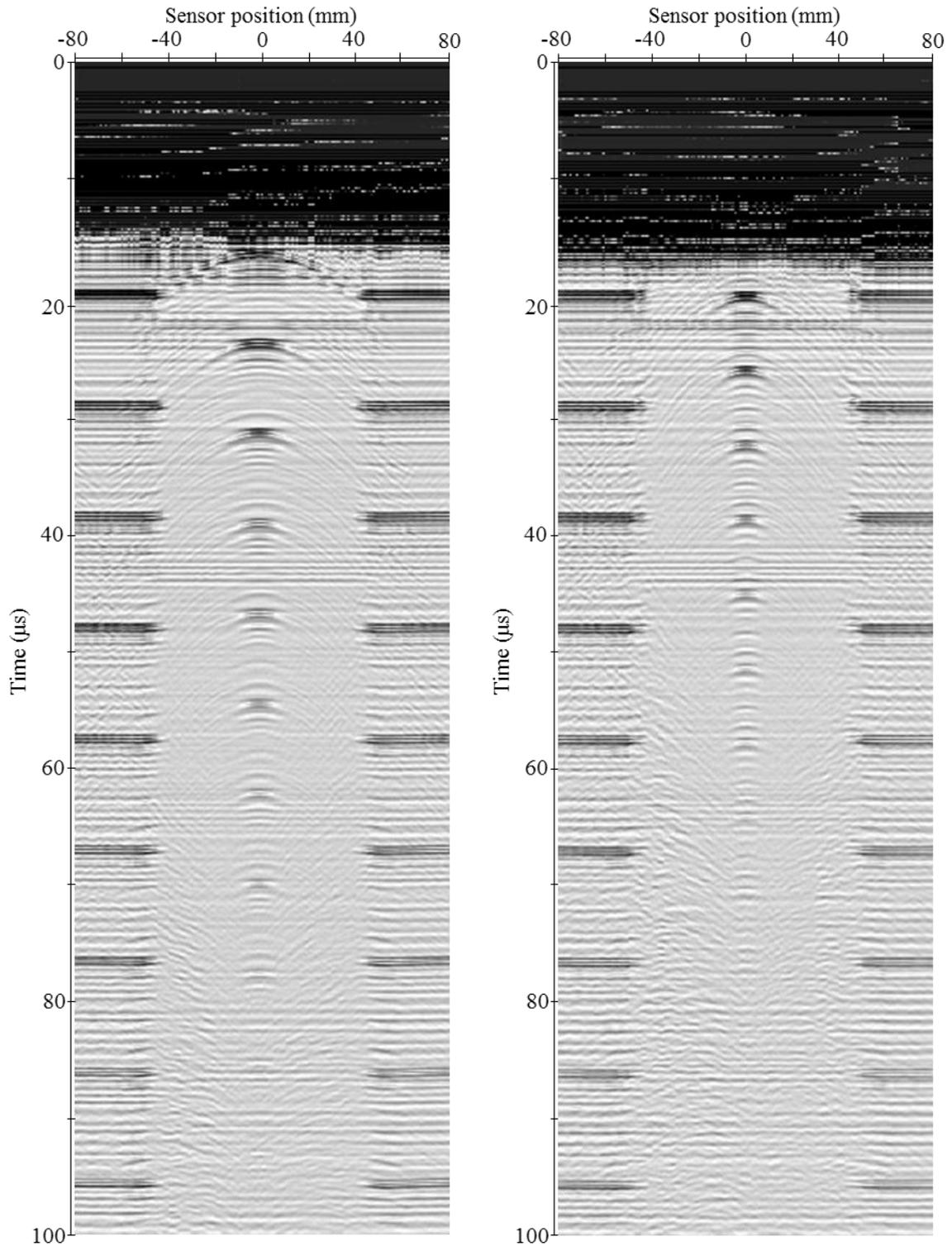
Fig. 3.3.3-8: Receiving waveform of a sample specimen with wall thinning. The Width of wall thinning is 10mm. The depth of wall thinning is 5mm.

減肉幅を明らかにするのに、Fig. 3.3.1-1(a) の試験体の測定結果から B スキャン画像を得た。Fig. 3.3.3-9~12 に示す。横軸はセンサと減肉の相対位置、縦軸はバースト波入射からの時間である。エコーの絶対値をグレースケールで表している。濃いほど絶対値は大きい。

センサ位置 0mm は減肉の頂点であり、Fig. 3.3.3-9, 10 では残肉を評価しているエコーが確認できる。エコー振幅から減肉端の位置は明らかである。減肉幅は平板と同じ手法で推定可能である。

また、減肉中央から外側に向かって波紋が広がるような信号が観測できる。Fig. 3.2.3-9 で示した試験体内部の超音波の可視化画像にあるように、減肉部で反射した超音波が拡散していくことを、実験からも確認できた。急峻な反射面で反射した超音波の振動は、反射によって入射面に対して水平方向から垂直方向へ変化する。用いた EMAT はコイルに対して水平方向の振動を起電力に変える横波用の構造のため、Fig. 3.3.3-11,12 の減肉部では垂直方向に変化した振動をとらえることができていない。

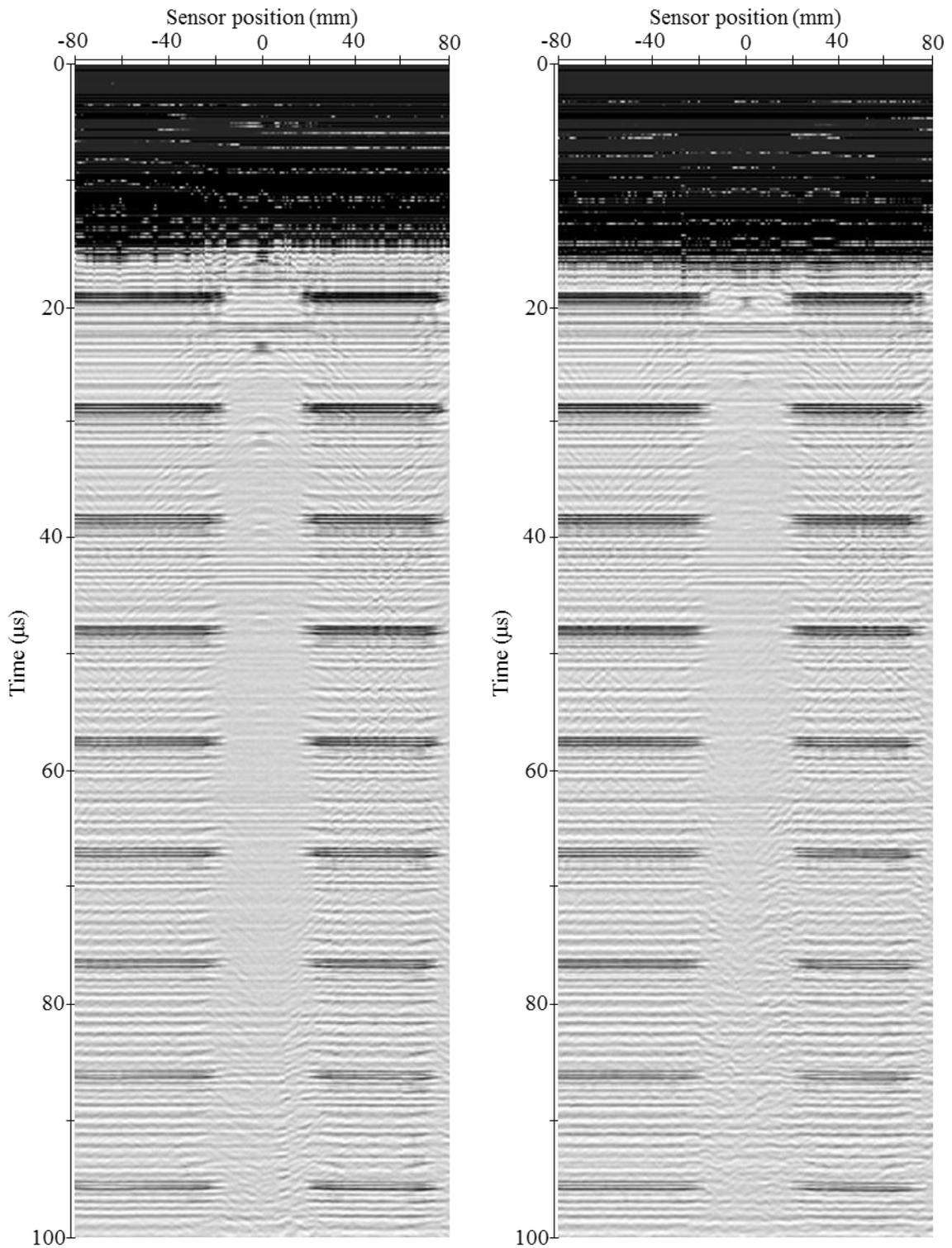
エコー間隔から試験体の厚さを評価した。結果を Fig. 3.3.3-13~16 に示す。配管であっても健全部であれば、超音波は十分な強度で検出が可能であった。一方減肉部においては、予想された通り超音波が散乱しているため、比較的減肉面の傾斜が緩やかな試験体以外は、定量的な評価は困難であった。



(a) Depth is 3mm.

(b) Depth is 5mm.

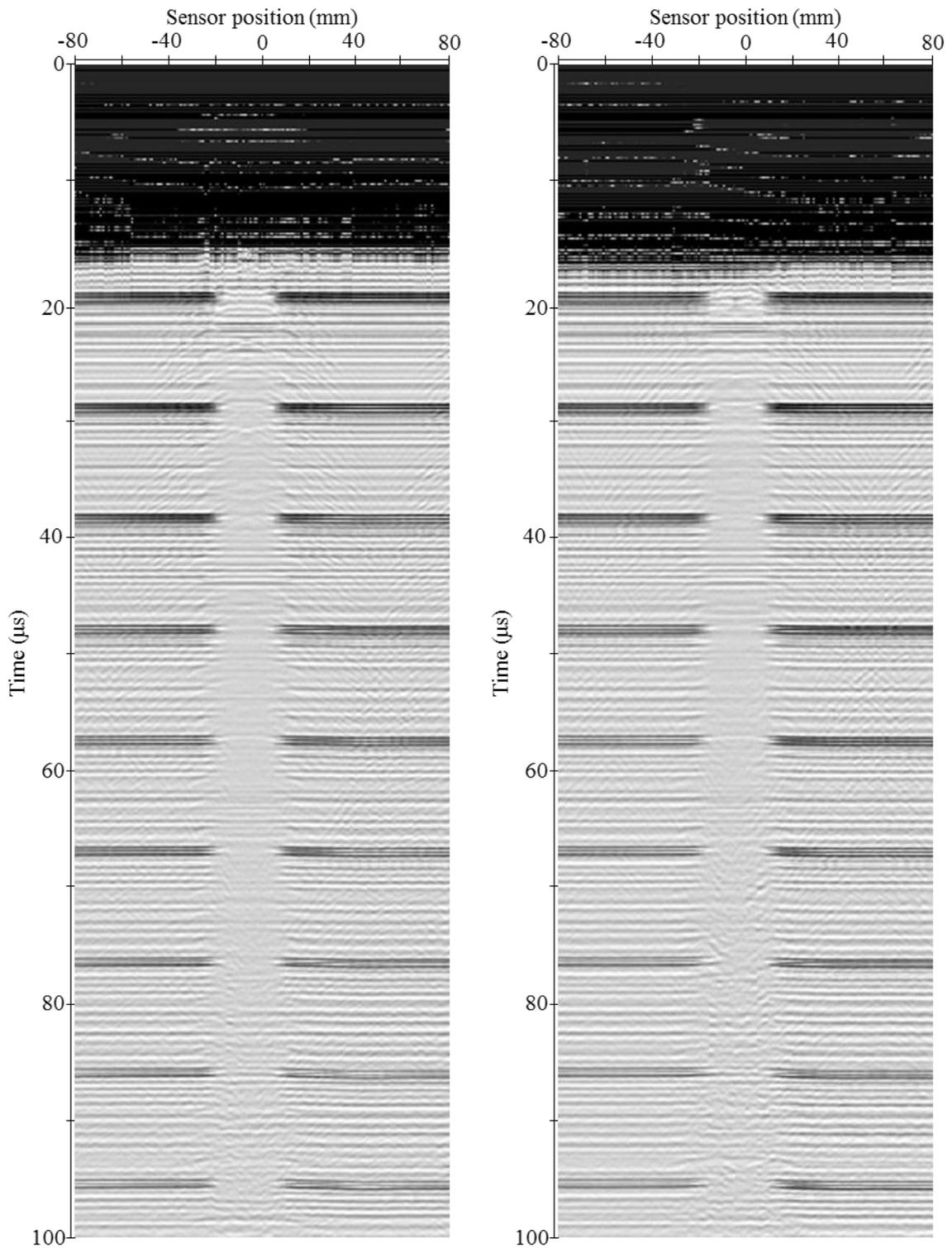
Fig. 3.2.3-9: B scope results of sample specimens with wall thinning. The width of wall thinning is 80mm.



(a) Depth is 3mm.

(b) Depth is 5mm.

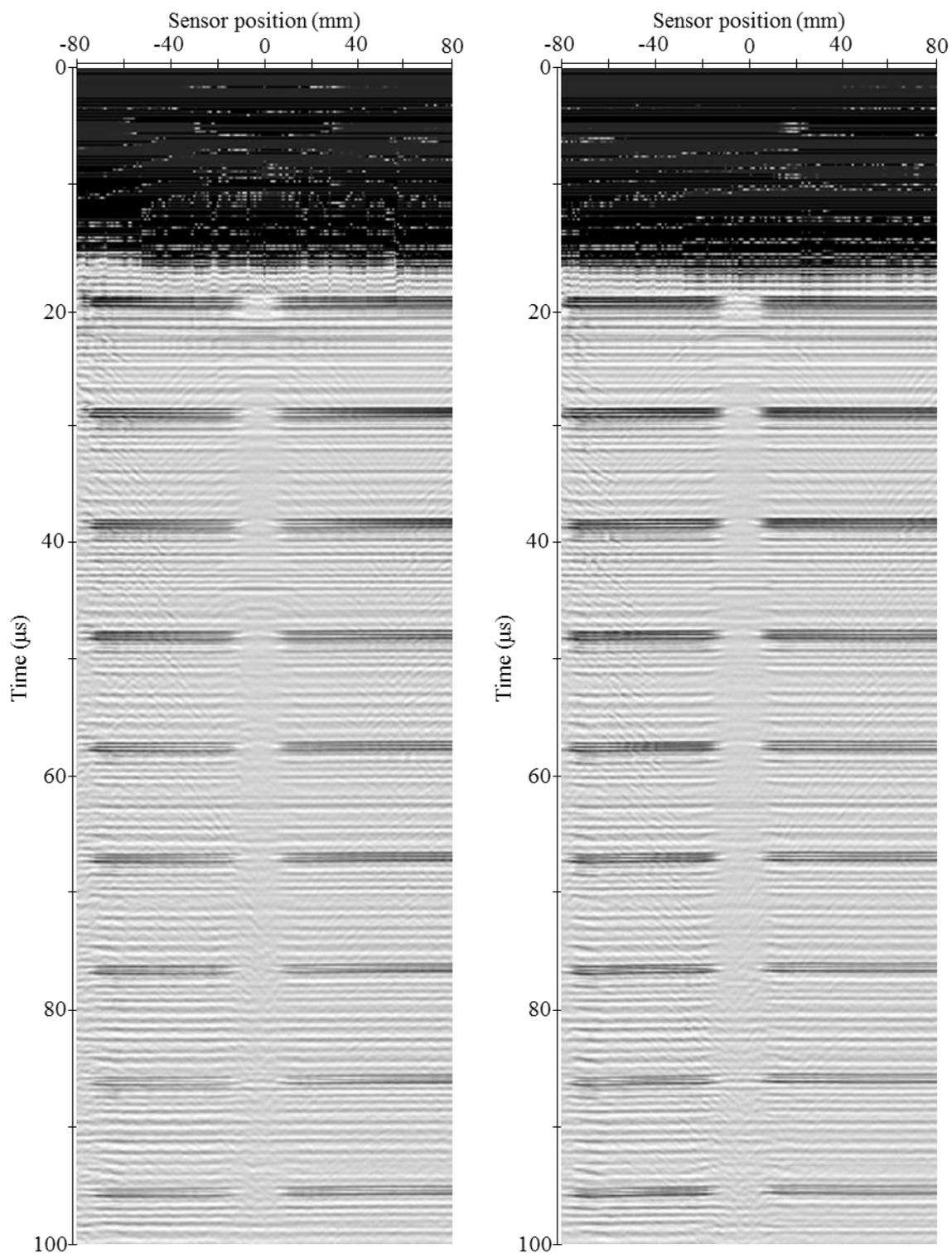
Fig. 3.2.3-10: B scope results of sample specimens with wall thinning. The width of wall thinning is 30mm.



(a) Depth is 3mm.

(b) Depth is 5mm.

Fig. 3.2.3-11: B scope results of sample specimens with wall thinning. The width of wall thinning is 20mm.



(a) Depth is 3mm.

(b) Depth is 5mm.

Fig. 3.2.3-12: B scope results of sample specimens with wall thinning. The width of wall thinning is 10mm.

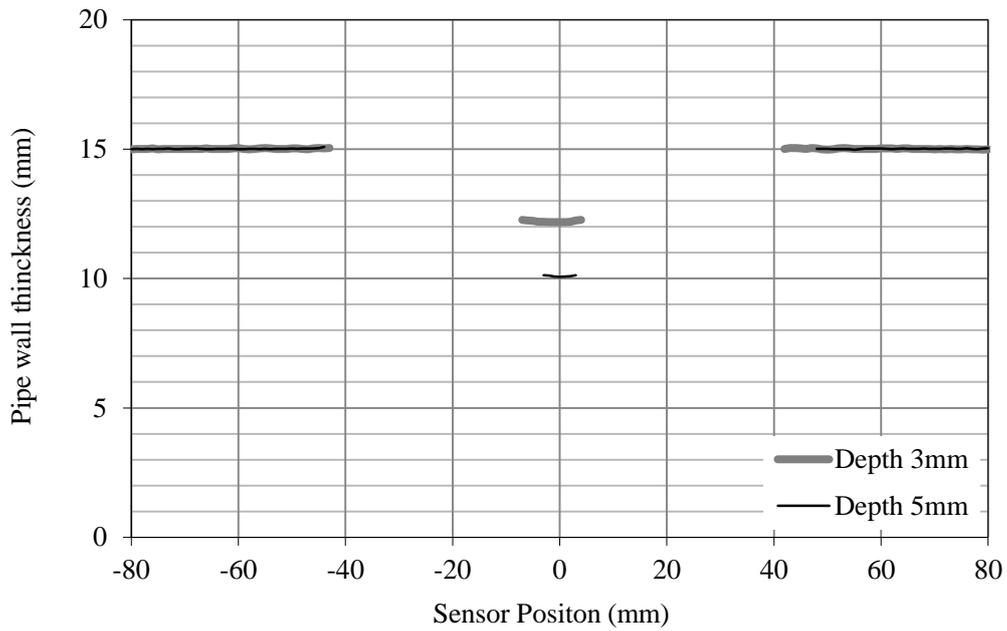


Fig. 3.3.3-13 Wall thickness evaluation by TOF of received waveforms. The width of wall thinning is 80mm.

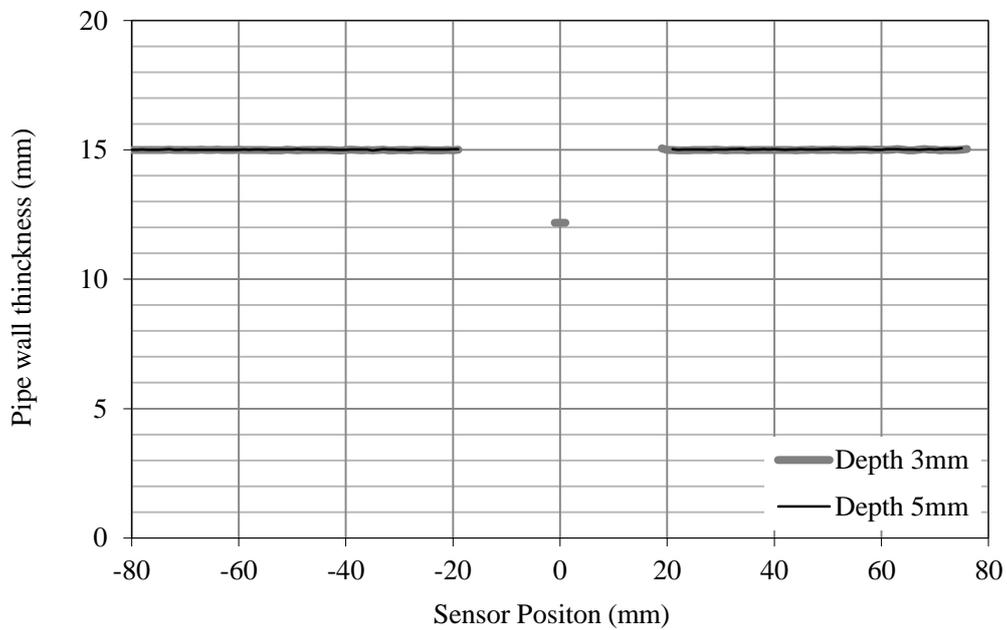


Fig. 3.3.3-13: Wall thickness evaluation by TOF of received waveforms. The width of wall thinning is 30mm.

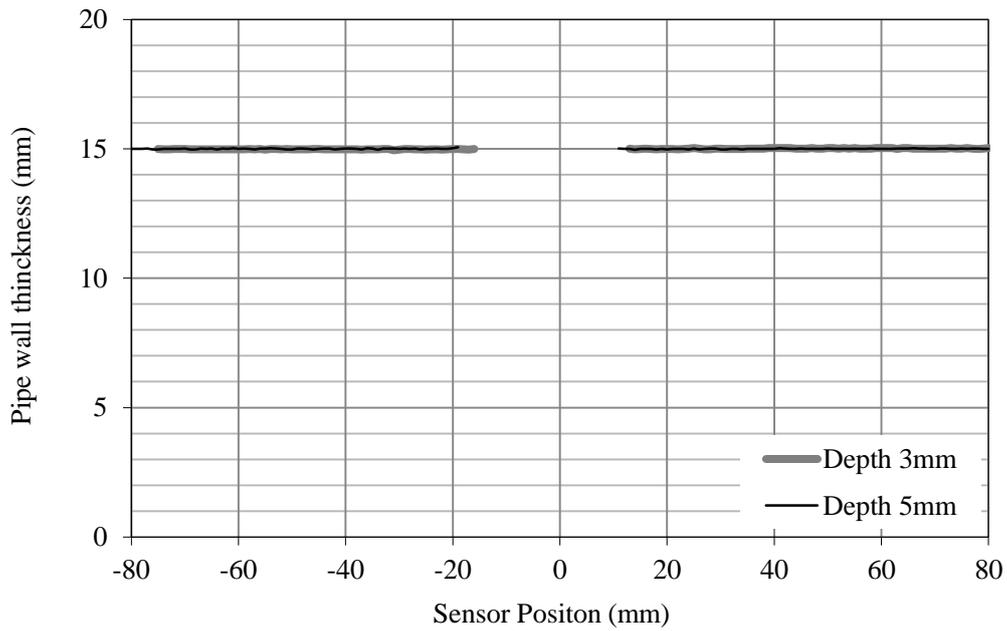


Fig. 3.3.3-15: Wall thickness evaluation by TOF of received waveforms. The width of wall thinning is 20mm.

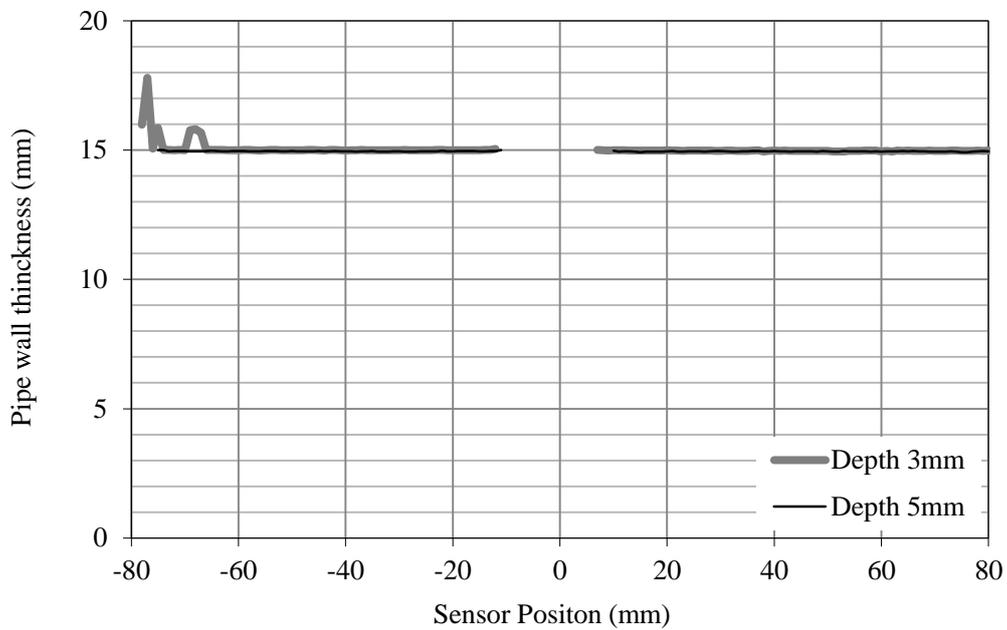


Fig. 3.3.3-16: Wall thickness evaluation by TOF of received waveforms. The width of wall thinning is 10mm.

次に、Fig. 3.3.1-1(b)の試験体の測定結果を示す。この試験体は、より広範囲に生じる初期の FAC を想定している。したがって、Fig. 3.3.1-1(a)の試験体より反射面の傾斜は緩やかである。

各試験体の B scope 画像を Fig. 3.3.3-17~20 に示す。すべての試験体で最も減肉が進んだ位置の残肉を評価できた。Fig. 3.3.3-17,18 においては減肉部のすべての領域で厚さを評価することができた。しかし、減肉が進んで超音波の反射面(減肉面)の傾斜が大きくなると、検出信号が弱くなる傾向は、Fig. 3.3.1-1(a)の試験体と同様である。

最後に、Fig. 3.3.1-1(c)の試験体の測定結果を示す。測定結果を Fig. 3.3.3-29,30 に示す。用いた EMAT はこの試験体の厚さをすべての位置を診断できた。

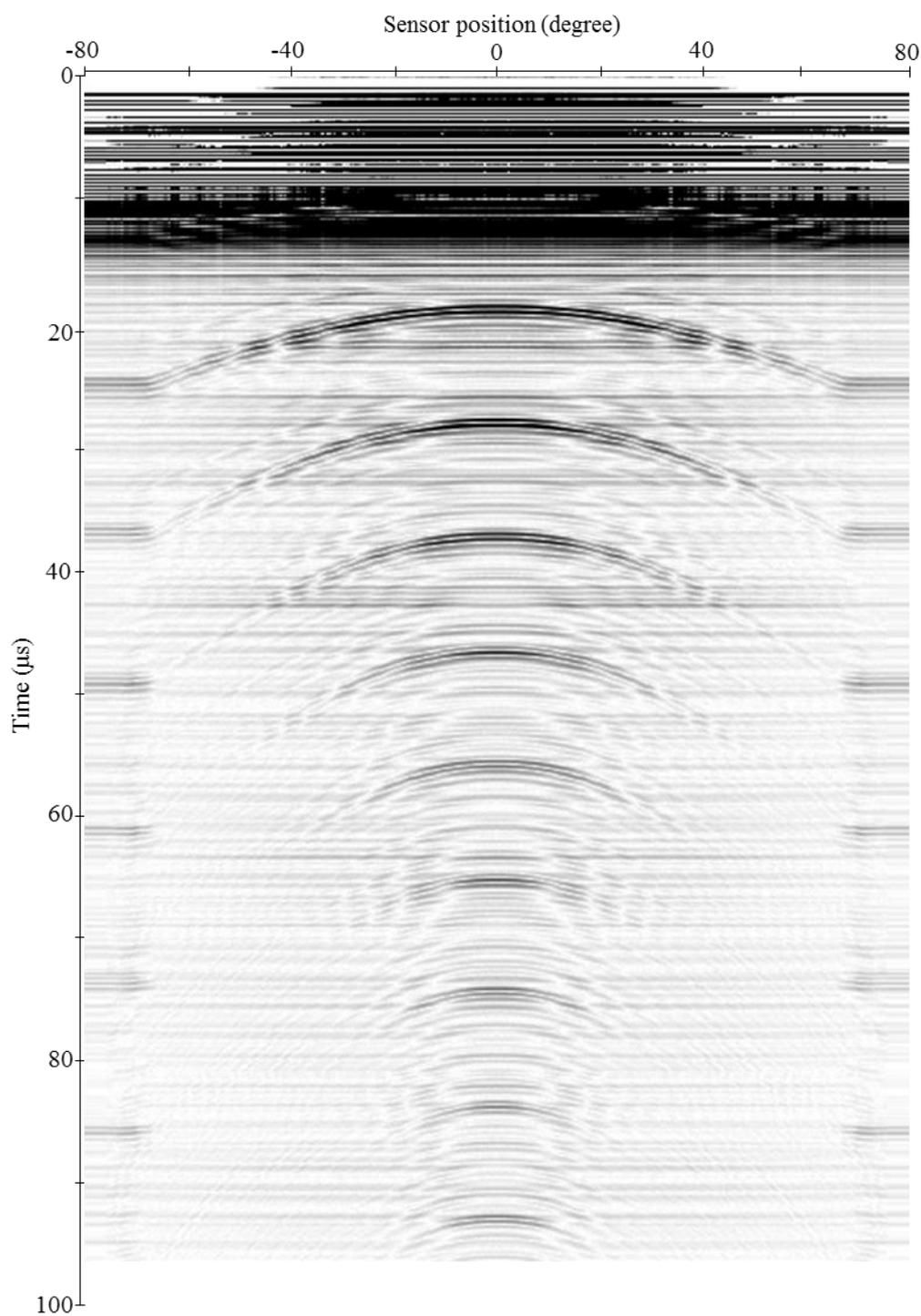


Fig. 3.2.3-17: B scope results of sample specimens with wall thinning. The width of wall thinning is 120degrees. The depth of wall thinning is 3mm.

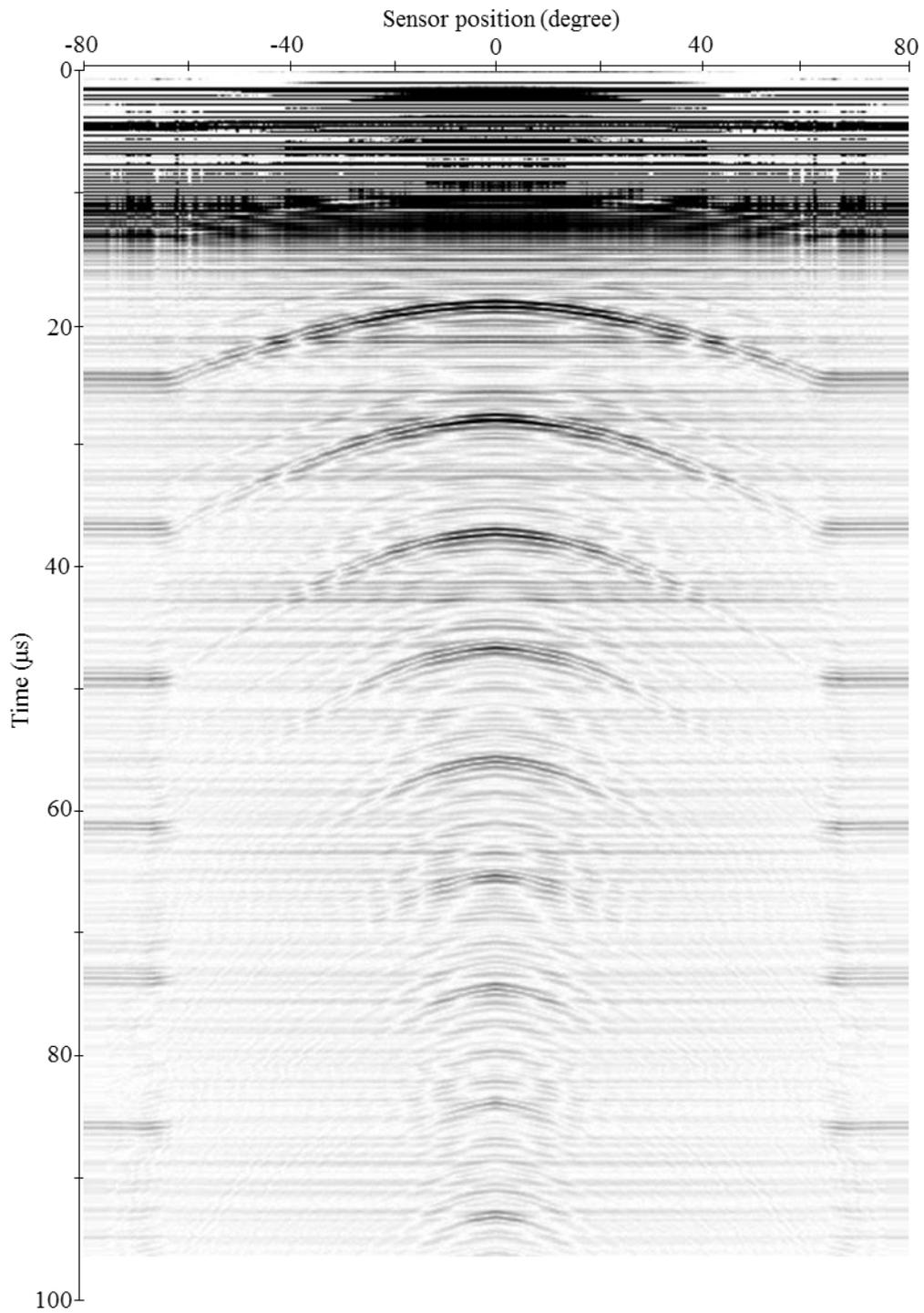


Fig. 3.2.3-18: B scope results of sample specimens with wall thinning. The width of wall thinning is 120degrees. The depth of wall thinning is 5mm.

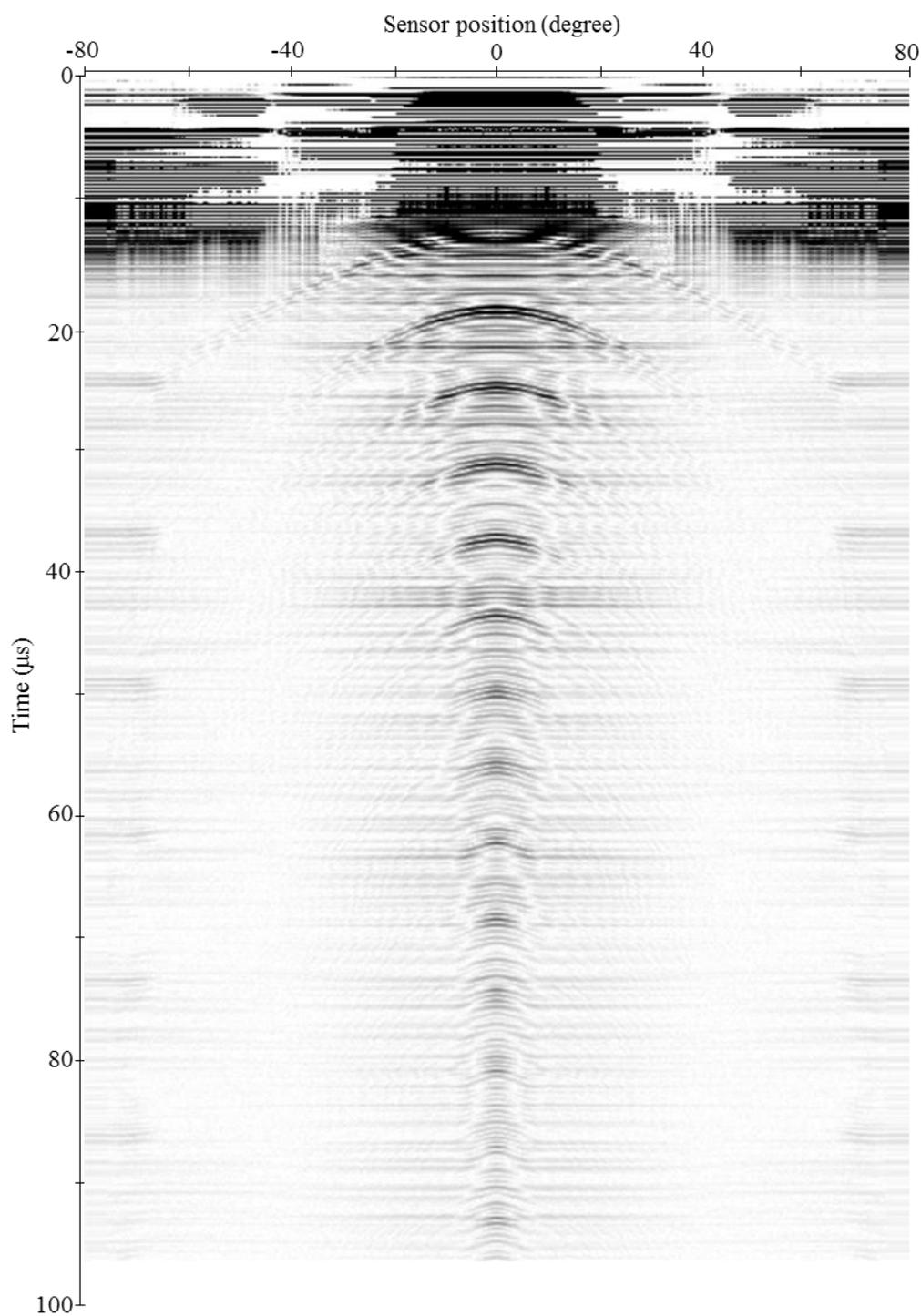


Fig. 3.2.3-19: B scope results of sample specimens with wall thinning. The width of wall thinning is 120degrees. The depth of wall thinning is 10mm.

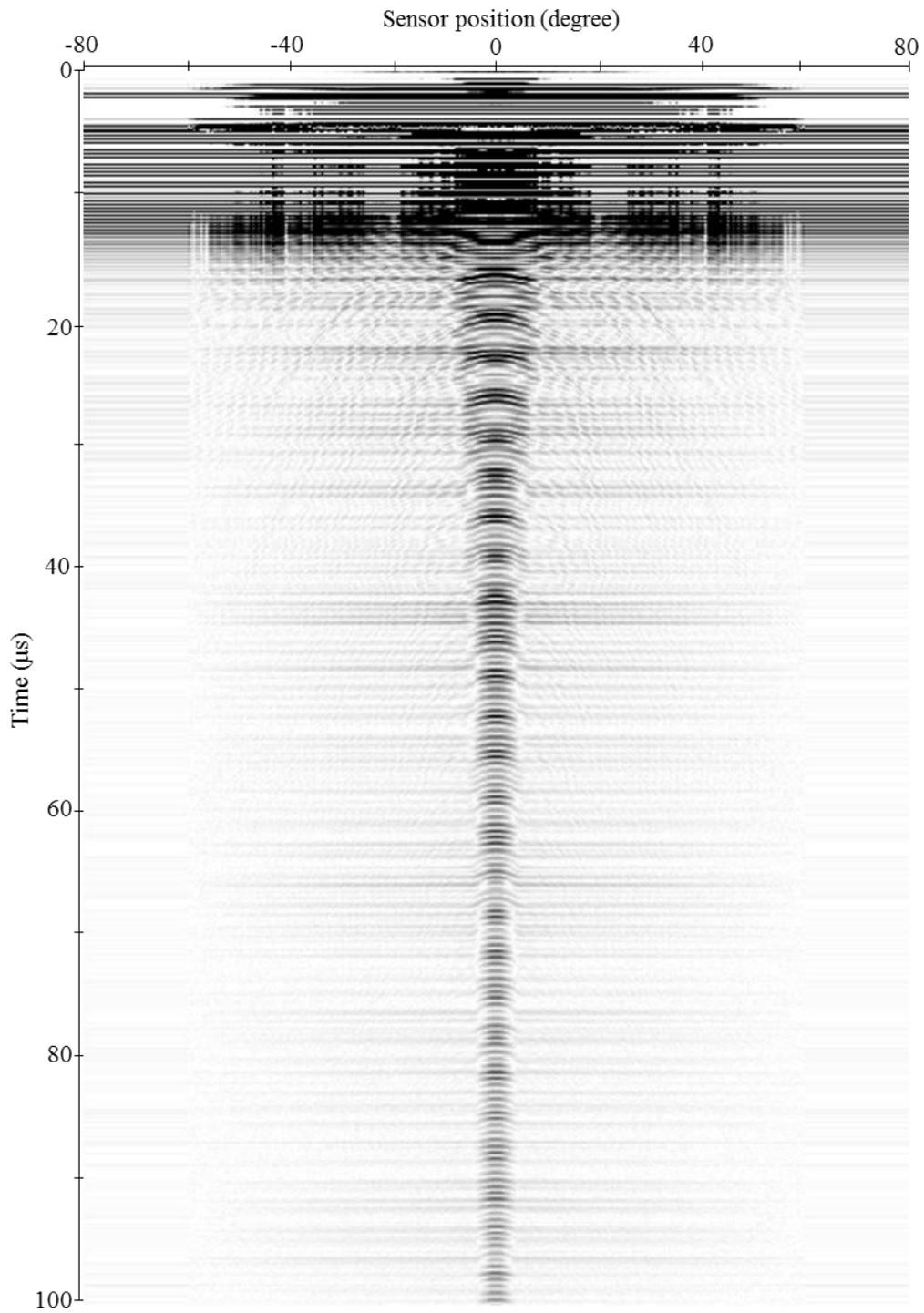


Fig. 3.2.3-20: B scope results of sample specimens with wall thinning. The width of wall thinning is 120degrees. The depth of wall thinning is 15mm.

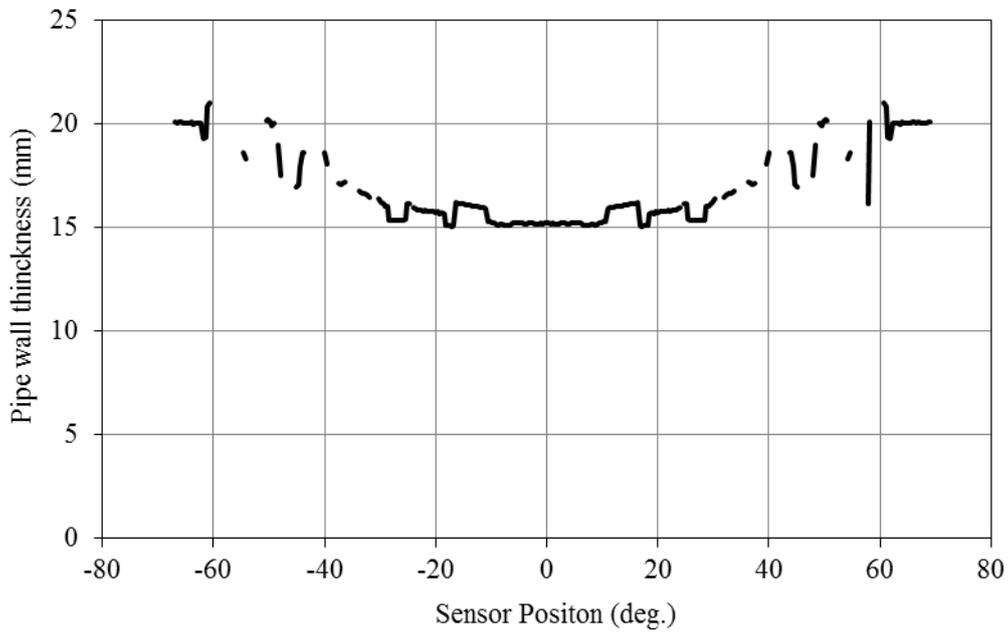


Fig. 3.3.3-25: Diagnosis result of depth = 3 mm.

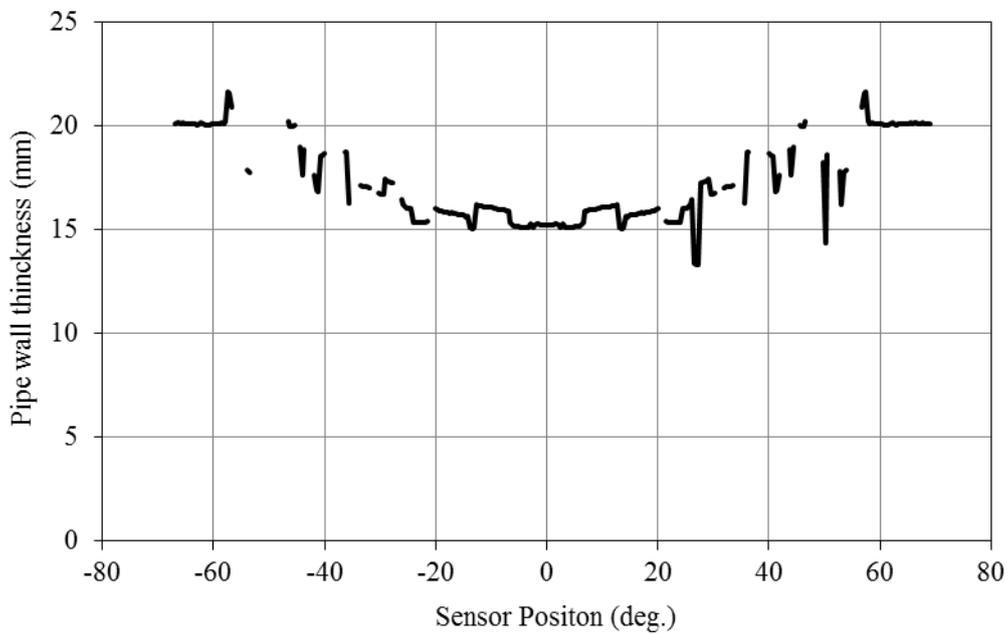


Fig. 3.3.3-26: Diagnosis result of depth = 5 mm.

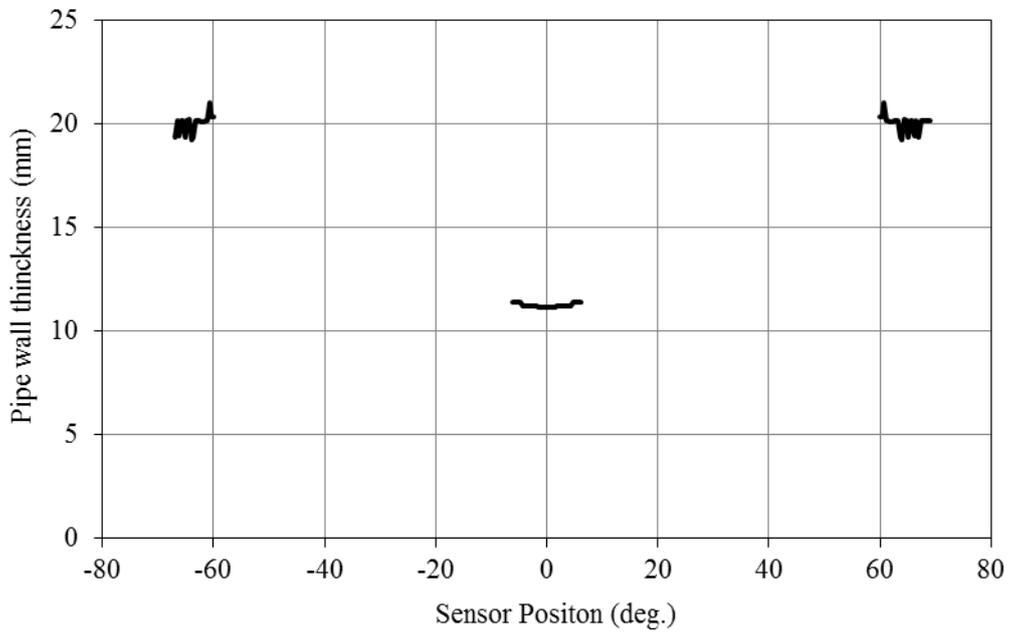


Fig. 3.3.3-27: Diagnosis result of depth = 10 mm.

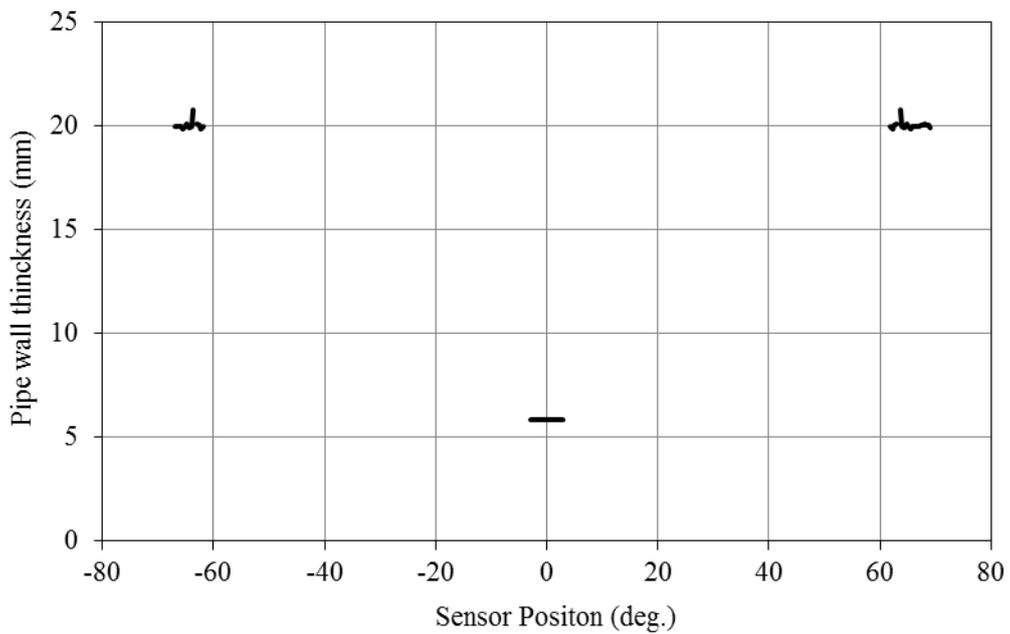


Fig. 3.3.3-28: Diagnosis result of depth = 15 mm.

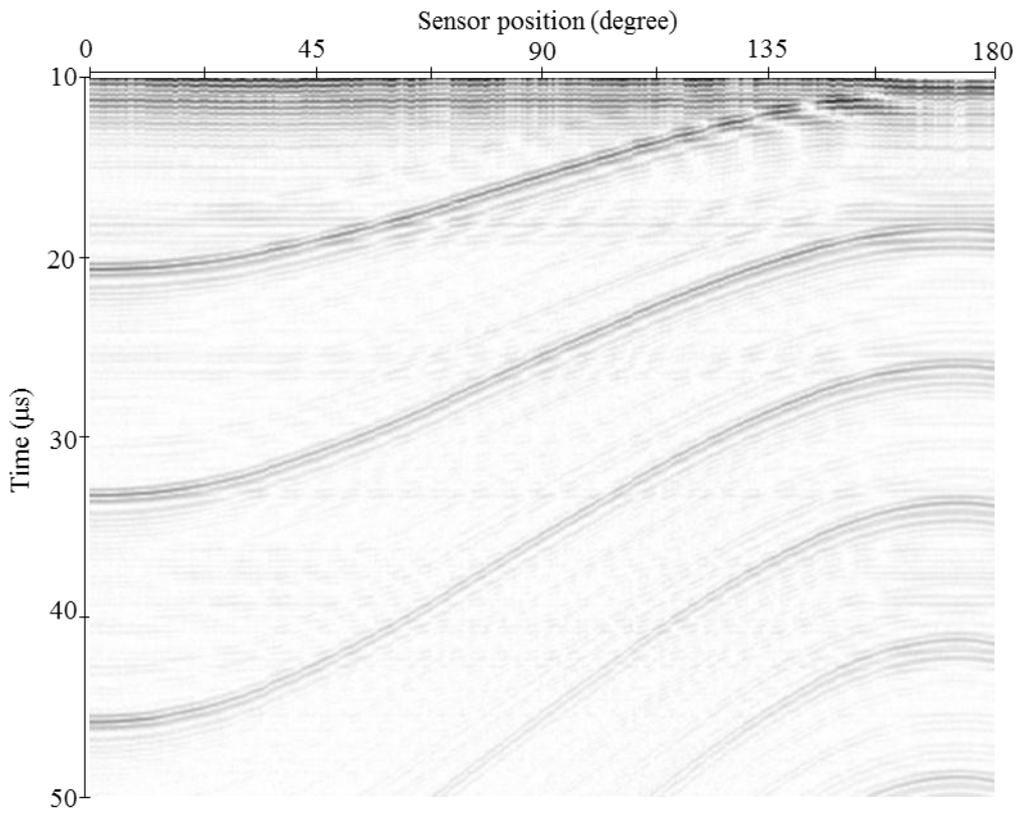


Fig. 3.3.3-29: B scope of full circumferential thinning.

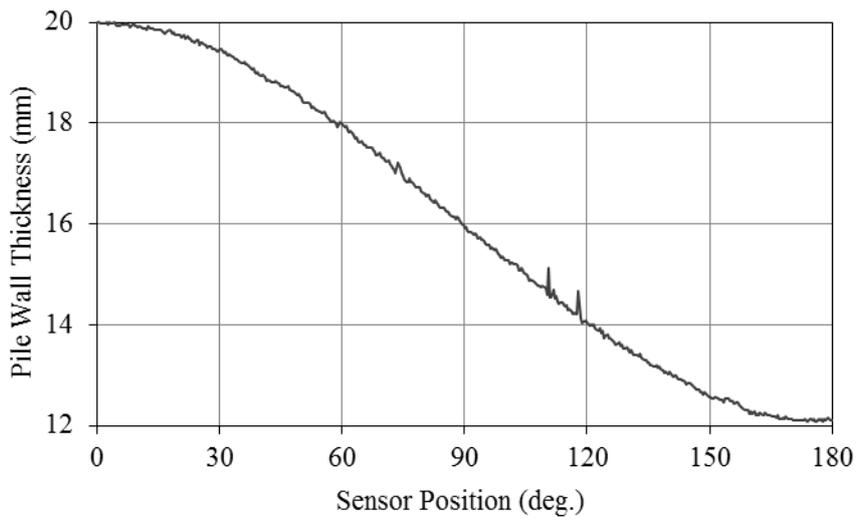


Fig. 3.3.3-30: Diagnosis result of full circumferential thinning.

3.4. 結言

本章では、平板に減肉を模擬した欠陥を加工し、配管減肉の管理における EMAT の適用可能性について検討を行った。減肉形状により、減肉深さの寸法化の可否について明らかにした。その結果、減肉面が超音波の入射面に対して 1.5 度以内であれば、超音波の減衰が 5 割程度に抑えられることをシミュレーションから明らかにした。

またセンサと減肉の相対位置を変化させた時の測定信号より、減肉幅を定量的に評価する手法を検討し、減肉形状寸法化法を提案した。本手法は比較的初期の FAC のような減肉の評価に有効であると考えている。

管の曲率の影響を確認するため、比較的呼び径の大きな管内部に平板と同様の減肉を加工し、検討を行った。外径 315mm の管においても健全部では十分な SN 比で厚さを評価することができた。半楕円の減肉については、平板と同様の傾向を示し、入射面の曲率がこの程度であれば、我々が用いたコイル径 10mm の EMAT においても平板と変わらない性能を得られることを確認した。また減肉に対しても平板と同様の傾向を示した。その場合の減肉面が超音波の入射面に対する角度は、シミュレーションで求めた 1.5 度以内であった。

これらの結果より、減肉形状を 2 次元でモデル化、減肉を半楕円で模擬、という条件付きではあるが、EMAT の検出性能の定量的評価ができたと言える。また、FAC のような LDI より減肉面が緩やかに変化する減肉の場合、減肉の頂点だけではなく全周にわたって厚さを評価できることを、管試験体で確認した。

今後の課題として、小口径管への対応が挙げられる。小口径管では入射面、反射面で超音波が減衰し、信号振幅の減少が予想される。また、より実機に近い、3 次元的な減肉についての検討も求められる。

次章にて、小口径管への検討を行うとともに、3 次元的な減肉の評価を試みる。またそれが可能な手法について議論する。

第4章 共振法を用いた模擬 FAC 減肉評価

4.1. 緒言

配管の健全性を保つために、定期的な検査によって減肉率を測定し、次の定期検査までに配管厚さが基準を下回らないように管理^[4]している。減肉はゆっくりと進むことが多く、減肉率を算出するには 0.1mm 程度の厚さ測定分解能と再現性が求められる。また、実機において、SUS 材より多く使われている SS 材への対応、また数の多い小口径管への対応は必須である。小口径管については、センサの有効面積の比較的大きい EMAT にとって、より条件が厳しいこともあり、その見当はなされてこなかった。そこで本章では、小口径炭素鋼管を対象とし、EMAT が FAC の進展を定量評価可能な程度の厚さ測定分解能を持っていることを確認にする。

本章は以下の 3 点からなる。最初に、実機適用を考慮した、厚さ測定分解能を確保可能な測定方法について検討を行う。より精密な定量評価を目的に 2 章で説明した共振法を用い、この手法が従来の超音波法と同程度の分解能を持っていることを確認する。

次に、小口径配管への適用の可能性を確認する。炭素鋼管に FAC の進展を想定したわずかに形状を変えた減肉をいくつか加工し、それぞれの形状を EMAT によって定量的に評価可能であることを確認する。

最後に、FAC の鱗片模様が EMAT の測定結果に与える影響についての考察を試みる。実際の FAC では減肉面に鱗片状の凹凸を持つことが知られている。管内部に凹凸を加工することが困難であるため、平板にボールエンドミルを用いて作成した試験体を用い、凹凸が共振に与える影響を考察する。

4.2. 共振法における厚さ測定分解能の確認

圧電素子型の探触子を EMAT で代用することを考えると、その厚さ測定分解能は圧電素子型の探触子と同等の 0.1mm 以下である必要がある。健全部の厚さを 10mm 程度とすると、0.1mm の分解能を得るためには、厚さ T に 3 桁の有効桁が必要である。そのためには式(2.3.2-4)より、音速 c 、共振周波数間隔 Δf の有効桁が 3 桁以上必要になる。本実験で用いた SS400 の場合、5mm 前後だと共振周波数間隔は数百 kHz になるので、有効桁を 3 桁とするには励磁に用いるバースト波の掃引間隔を 1kHz 以下とする必要がある。共振周波数間隔を測定するには最低でも 2 つの共振状態、一般的には 3 つ以上の共振状態を得る必要があり、これは 1MHz 程度の範囲を、1kHz 間隔で掃引する必要があることを示している。先に挙げた測定条件はこれを満たしているため、0.1mm の厚さ測定分解能を得られるはずである。これを実験から確認する。測定装置は 3.3 と同じものを用いる。ただし、試験体は平板であるため、回転ステージは用いない。

まず、使用した EMAT の測定範囲が十分な広さを持つことを確認するため、SS400 材の厚さ 3.00, 5.00, 10.00, 15.00, 20.00mm の平板の単一周波数励磁を用いて測定を行った。3.00mm と 20.00mm の共振スペクトルを Fig. 4.2-1 に示す。3.00mm, 20.00mm の Δf はそれぞれ 533kHz, 80kHz であり、板厚に応じた Δf が確認できる。3.00mm と比較すると、20.00mm の共振エネルギーは約 1/3 になっている。しかし、十分に評価可能な SN 比を維持している。3.00mm から 20.00mm の評価結果を Fig. 4.3-2 に示す。図中ではノギスで測定した結果を実線で結び、それを真値とした。3.00mm から 20.00mm まで、 Δf は線形に変化しており、十分な測定範囲を持っていることを確認できた。

次に、分解能を確認するため、厚さ 3.50, 4.00, 4.40, 4.70, 4.90mm の平板の測定を 5 回行った。4.90mm と 5.00mm の共振スペクトルを Fig. 4.2-3 に示す。4.90mm, 5.00mm の Δf はそれぞれ 328kHz, 322kHz であり、0.10mm 差による Δf の違いを確認できる。判定結果と真値(ノギスでの測定結果)との比較を Fig. 4.2-4 に示す。最大誤差は 0.04mm であり、真値と測定結果はほぼ一致している。十分な厚さ測定分解能を持っていることを確認した。

また、各試験体の共振スペクトルを Fig. 4.2-5~14 に示す。各測定結果は Fig. 4.2-2, 4 を作成するのに用いたものである。共振スペクトルが、厚さが厚くなることにより Δf が小さくなり、振幅も小さくなっていくことが分かる。

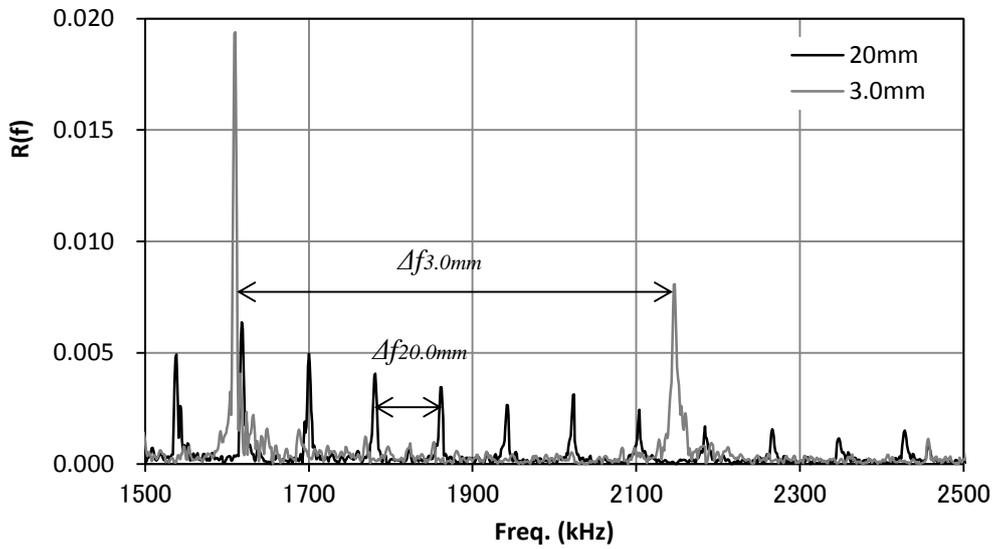


Fig. 4.2-1: Frequency spectrum of resonance waveform with 3mm and 20mm

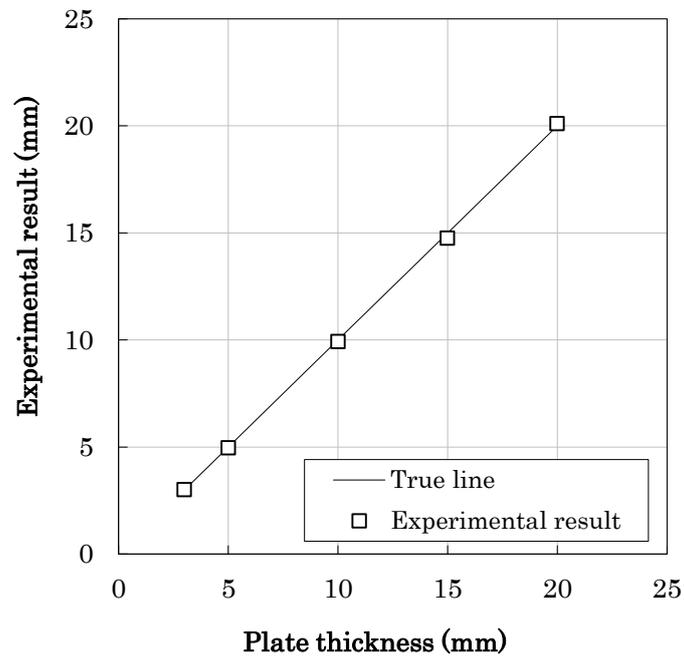


Fig. 4.2-2: Performance of dynamic range of the EMAT

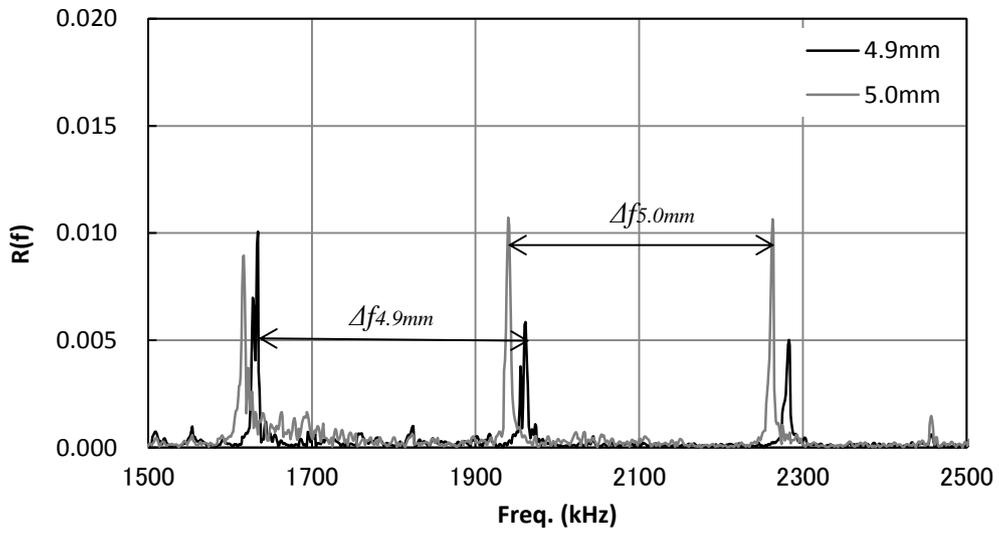


Fig. 4.2-3: Frequency spectrum of resonance waveform with 4.9mm and 5mm

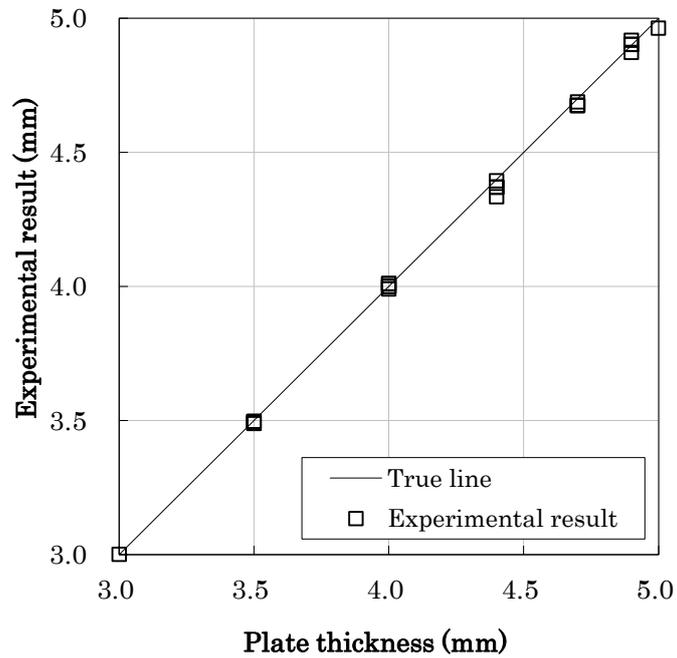


Fig. 4.2-4: Performance of resolution of the EMAT

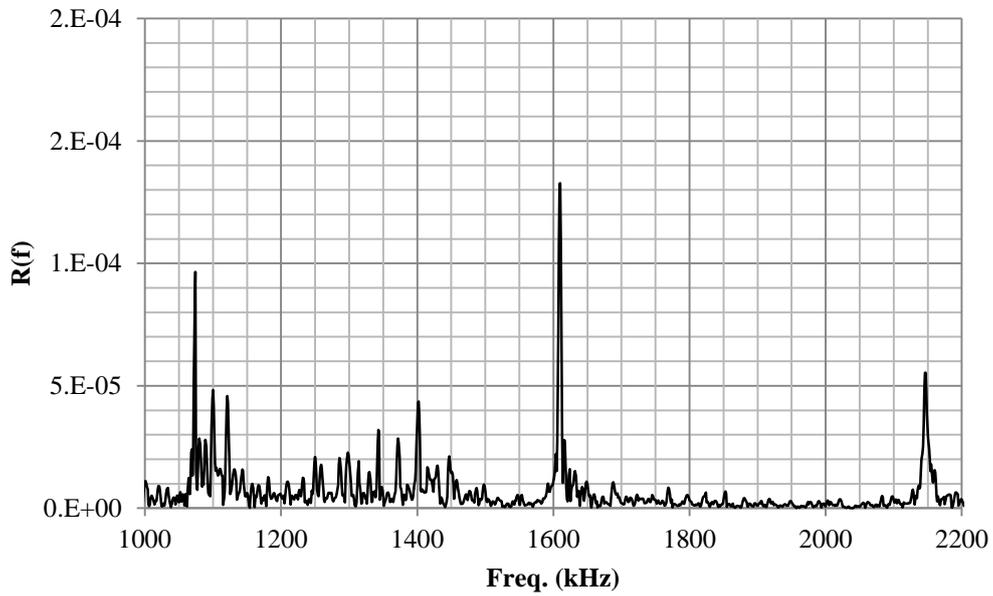


Fig. 4.2-5: Frequency spectrum of resonance waveform with 3mm thickness.

($\Delta f = 533\text{kHz}$)

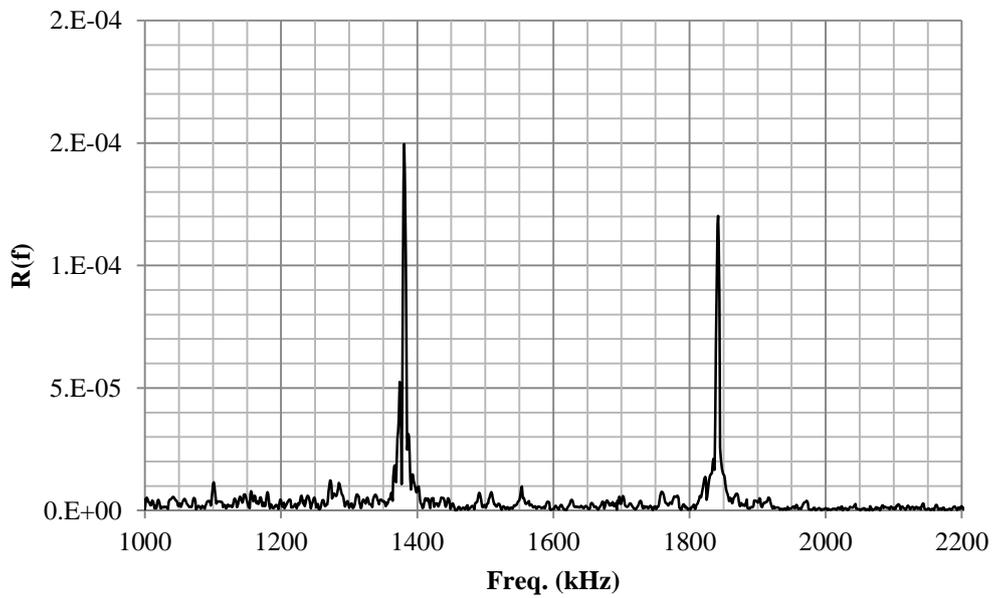


Fig. 4.2-6: Frequency spectrum of resonance waveform with 3.5mm thickness.

($\Delta f = 459\text{kHz}$)

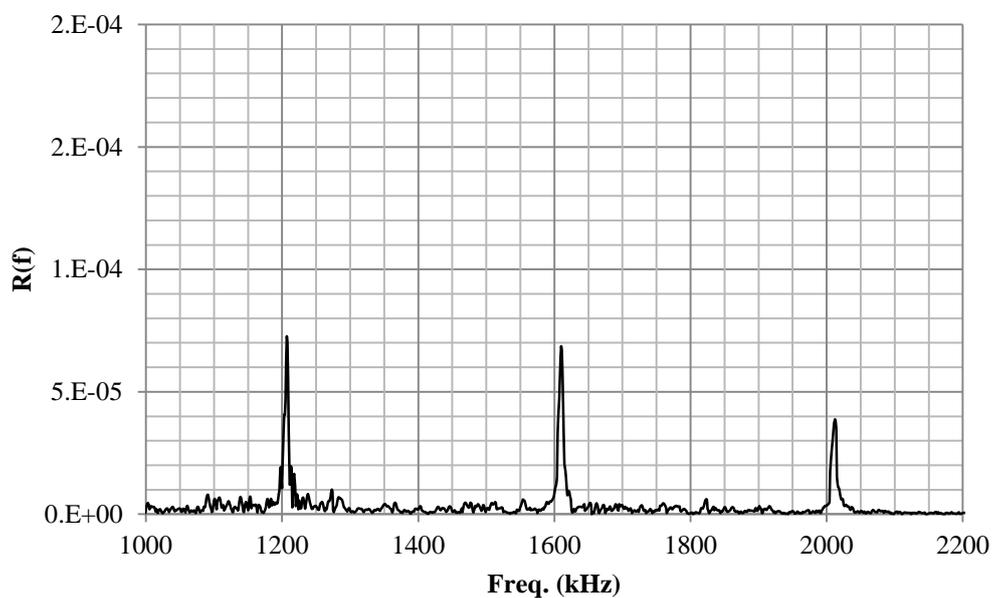


Fig. 4.2-7: Frequency spectrum of resonance waveform with 4mm thickness.

($\Delta f = 401\text{kHz}$)

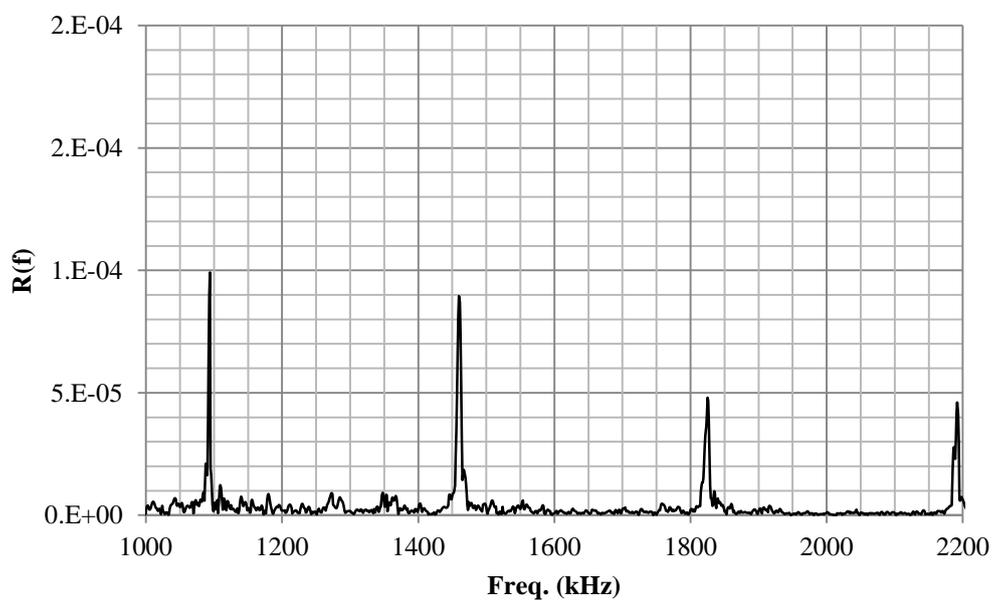


Fig. 4.2-8: Frequency spectrum of resonance waveform with 4.4mm thickness.

($\Delta f = 364\text{kHz}$)

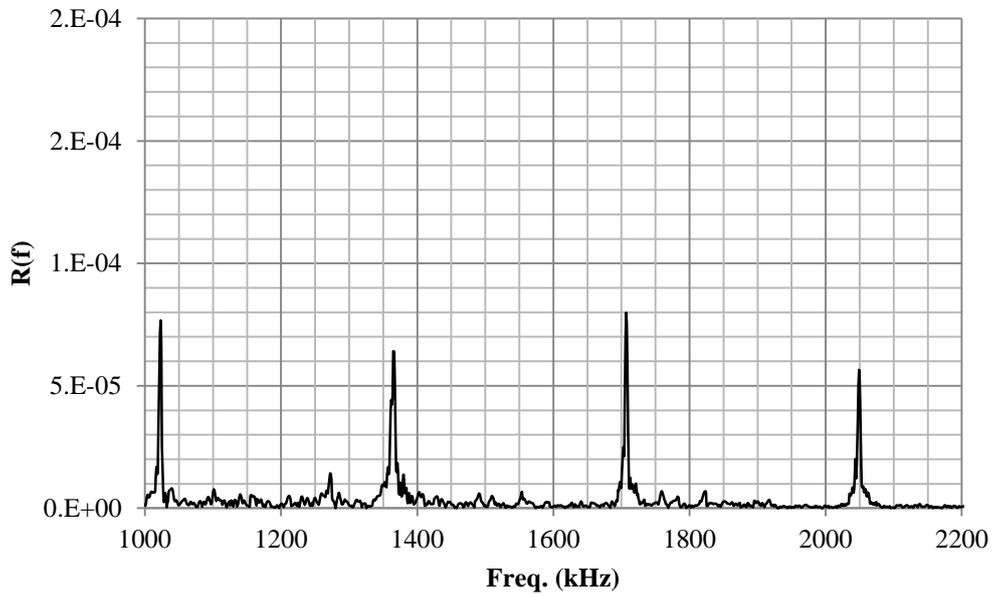


Fig. 4.2-9: Frequency spectrum of resonance waveform with 4.7mm thickness.
($\Delta f = 341\text{kHz}$)

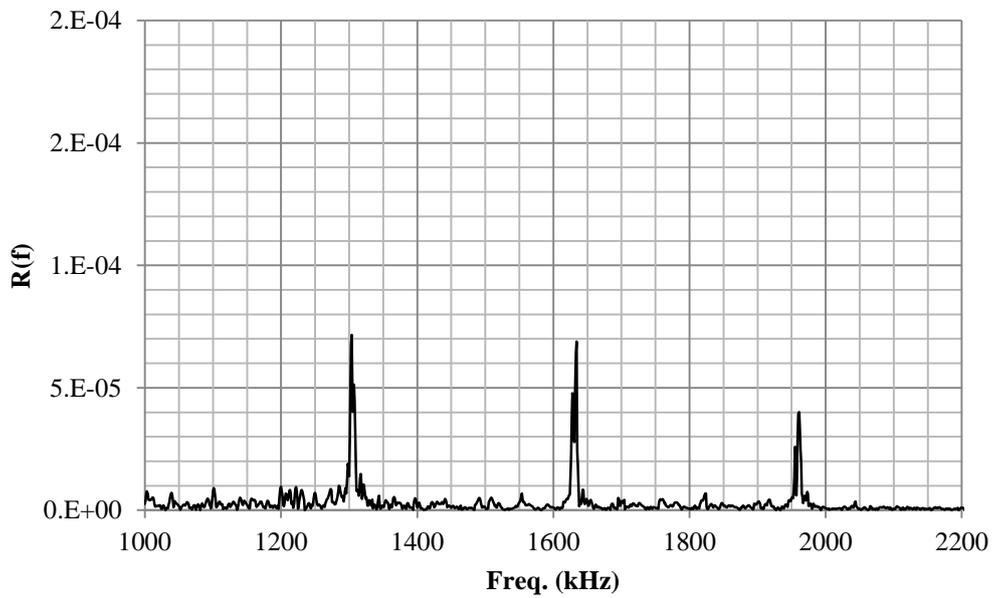


Fig. 4.2-10: Frequency spectrum of resonance waveform with 4.9mm thickness.
($\Delta f = 328\text{kHz}$)

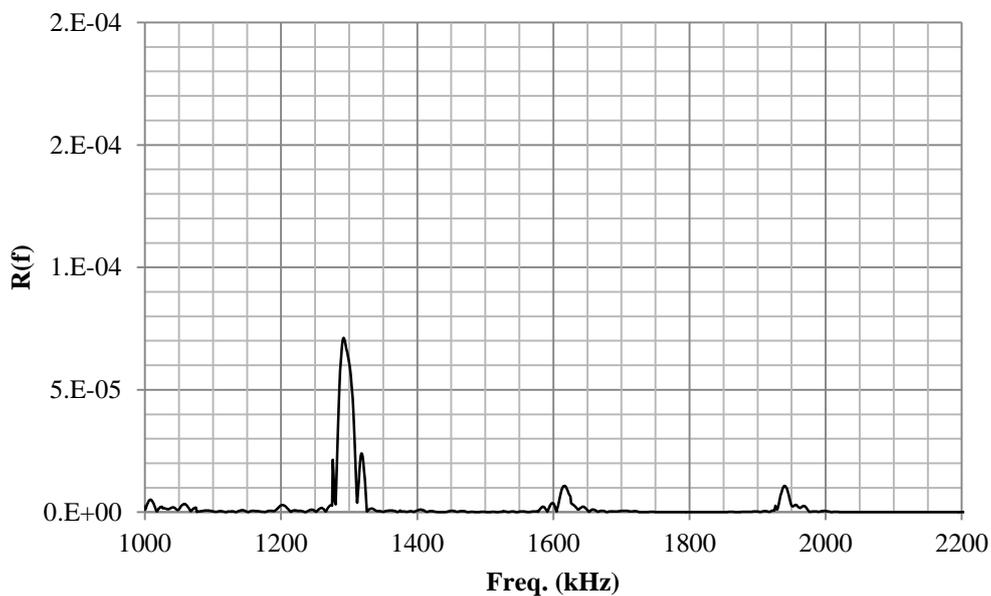


Fig. 4.2-11: Frequency spectrum of resonance waveform with 5mm thickness.
($\Delta f = 322\text{kHz}$)

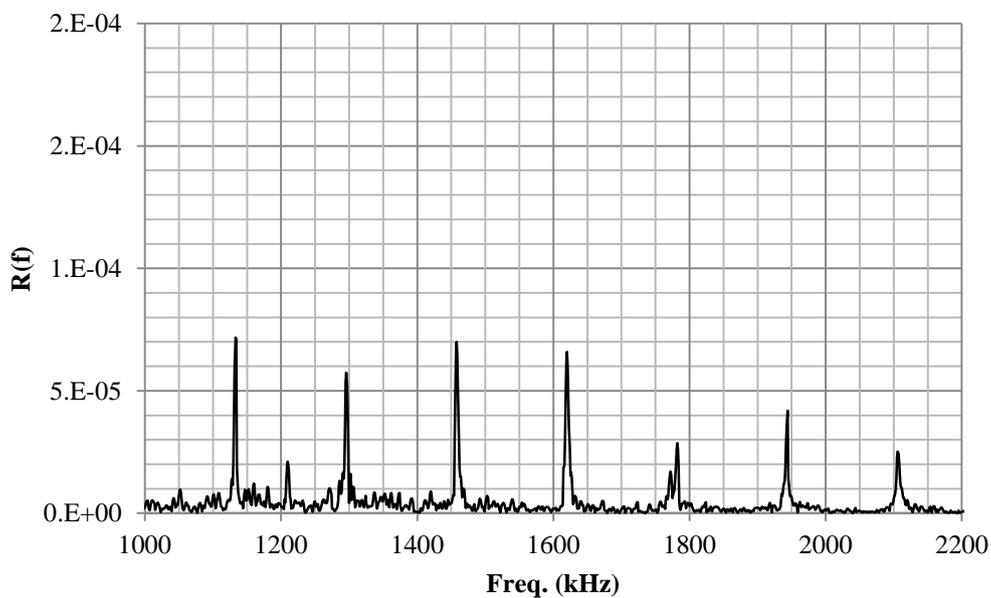


Fig. 4.2-12: Frequency spectrum of resonance waveform with 10mm thickness.
($\Delta f = 161\text{kHz}$)

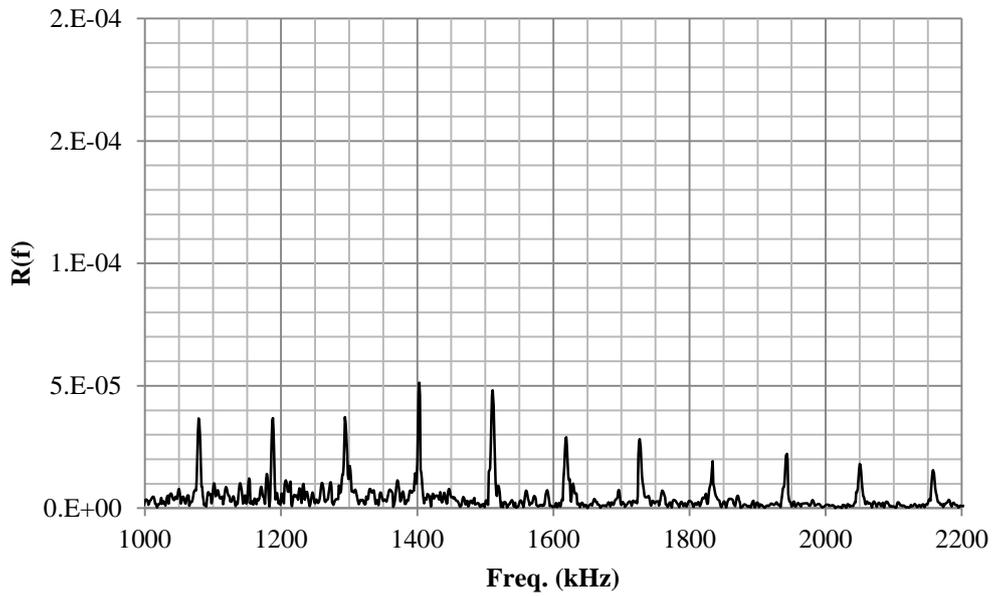


Fig. 4.2-13: Frequency spectrum of resonance waveform with 15mm thickness.

($\Delta f = 108\text{kHz}$)

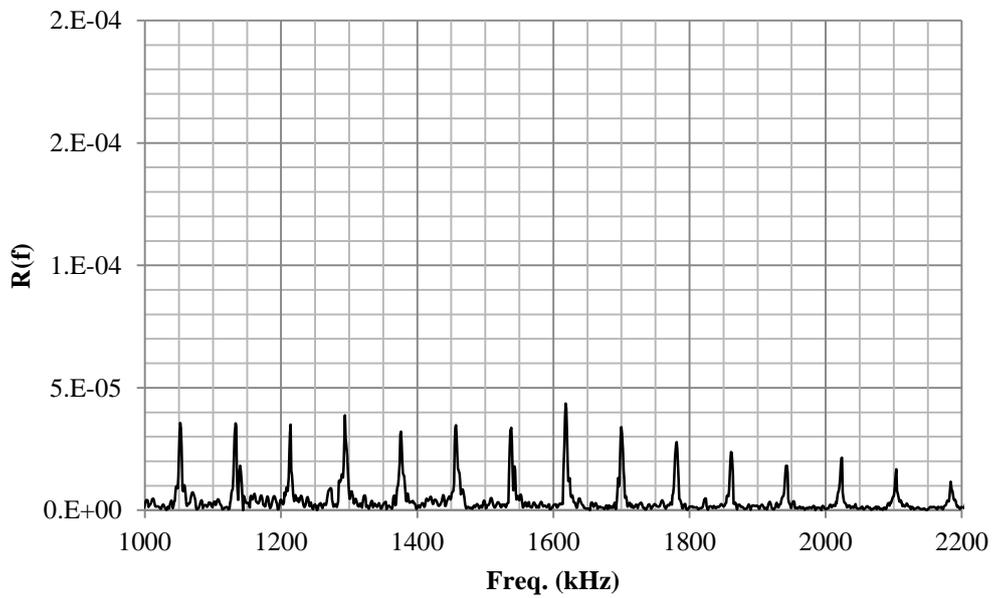


Fig. 4.2-14: Frequency spectrum of resonance waveform with 20mm thickness.

($\Delta f = 80\text{kHz}$)

4.3. 模擬 FAC 試験体を用いたオリフィス下流減肉の進展測定

本節では、炭素鋼管に生じる FAC への EMAT の適用について検討を行う。FAC をマクロ的な視点から考察し、2 種類の試験体を作成した。最初に、各試験体についての説明を行い、次にそれぞれの試験体の測定結果について述べる。

4.3.1. 試験体

FAC はオリフィス下流、管軸方向にマクロ的には緩やかな減肉カーブを持つことが知られている。そこで、1 つ目は、旋盤を用いて配管内部に円弧状の減肉を加工した試験体を作成した。FAC の減肉カーブを軸方向の円弧で模擬している。この試験体を、模擬全周 FAC 試験体と呼ぶ。試験体母材は STP370 である。"a"は減肉の軸方向長さで、"b"は減肉量(健全部と減肉部の厚さの差)となる。加工寸法は、母材の公差(0.1mm)、歪みの影響によりある程度の誤差を含んでいる。減肉深さについては、減肉端に旋盤のバイスを置いてそこから最大減肉深さまで切削しているので、ある程度信頼のおける寸法である。母材の公差、配管という用途状、真円を保証する必要はないので配管はある程度歪んでおり、旋盤のバイスが同一円周上で配管内面から離れることがある。したがって、減肉幅については、減肉深さが小さいこともあり、減肉端の減肉量は 0.1mm より小さく、位置によっては加工寸法が 10mm 程度小さい可能性もある。配管内面であるため、ノギス等で正確な寸法を得ることが困難であるため、加工寸法は減肉の大よその形を知るためのものであり、同一箇所を UT で測定した値を真値として、EMAT の評価を行う。模擬全周 FAC 試験体の形状を Fig. 4.3.1-1 に示す。加工した減肉のパラメータを Table 4.3.1-1 に示す。各試験体の減肉量は 0.5mm ほどしか変化がなく、これを定量的に評価することで、FAC の進展を測定できることを確認する。また、FAC は配管内径の 3 倍程度の軸方向長さを持つことが知られているので、2B 配管において軸方向長さ 120mm の減肉の試験体を作成し、より実際の FAC に近い試験体の評価も試みた。

2 つ目に、部分的な減肉を持つ FAC 試験体を作成した。オリフィスの設置状況によって、オリフィス下流部における流体の流れに偏りが生じる場合がある。それは配管減肉の偏りにつながる。この場合、軸方向だけではなく周方向に減肉のムラが存在するため、全周減肉の場合と比べて超音波の散乱がより強くなり、位置によって SN 比が更に低下することが考えられる。これを想定した試験体を Fig. 4.3.1-2 に示す。これを模擬部分 FAC 減肉試験体と呼ぶ。2B 配管に軸方向に円弧状の最大減肉幅 $a = 120\text{mm}$ 、最大減肉深さ $b = 1.0\text{mm}$

4.3 模擬 FAC 試験体を用いたオリフィス下流減肉の進展測定

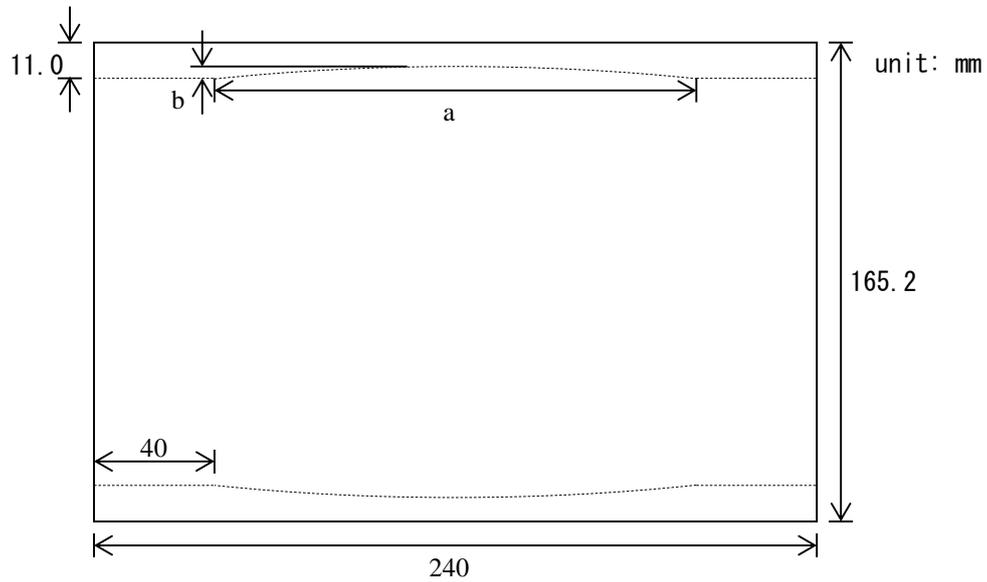
を旋盤にて加工した。配管の中心軸と加工軸をずらすことで、片側のみを切削している。

Fig. 4.3.1-2 のように、配管の左端から 700mm～820mm の箇所に減肉加工を施した部分減肉試験体を周方向に 8 点 (a, b, c, d, e, f, g, h) , 軸方向に 21 点 (10mm 間隔), 計 168 点の測定を UT と EMAR 法によって行う。

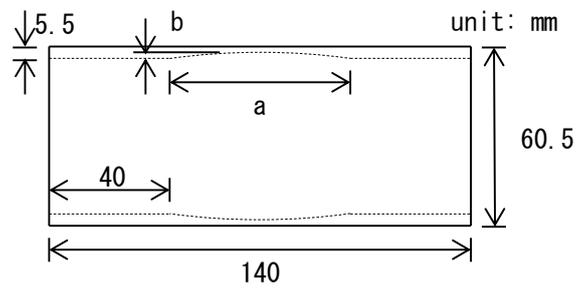
上記のような FAC の進展を模擬した試験体を用いて、EMAR 法を用いた EMAT が、UT と同程度に評価できるかどうかを検証する。



(a) Side view



(b) 6B



(c) 2B

Fig. 4.3.1-1: Test pipe with mock-up FAC.

Table 4.3.1-1: Parameters of sample specimens

| Nominal diameter | Length (mm) | Outer diameter (mm) | Wall thickness (mm) | Axial length 'a' (mm) | Corrosion depth 'b' (mm) |
|------------------|-------------|---------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|
| 6B | 240 | 165.2 | 11.0 | 165 | 0.5 |
| 6B | 240 | 165.2 | 11.0 | 165 | 1.0 |
| 2B | 140 | 60.5 | 5.5 | 60 | 0.4 |
| 2B | 140 | 60.5 | 5.5 | 60 | 0.5 |
| 2B | 2000 | 60.5 | 5.5 | 60 | 0.5 |
| 2B | 140 | 60.5 | 5.5 | 60 | 1.0 |
| 2B | 2000 | 60.5 | 5.5 | 30 | 1.0 |
| 2B | 2000 | 60.5 | 5.5 | 120 | 0.5 |

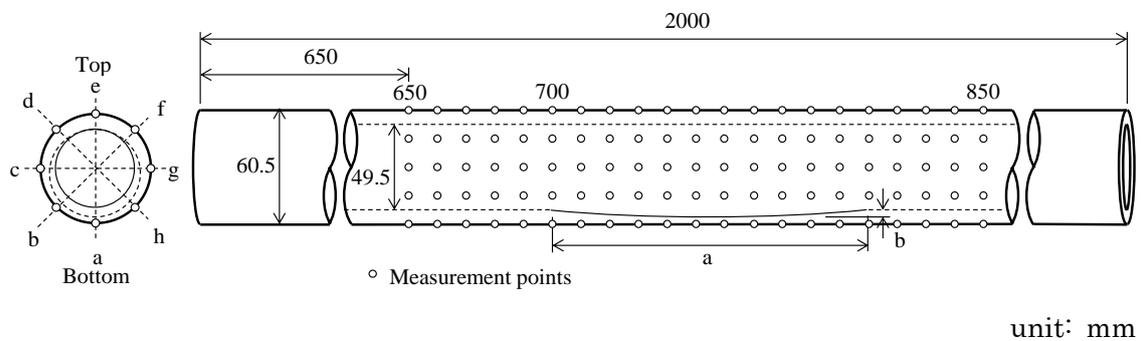


Fig. 4.3.1-2: Test pipe with mock-up spot corrosion.

4.3.2. 測定方法

配管の減肉管理については、(社)日本機械学会の減肉管理技術規格^[14]が用いられており、Fig. 4.3.2-1 に示すように配管の形状、径に応じた定点の厚さを測定することで、健全性を担保している。この技術規格に適合するためには、一か所あたり、断熱材下に最大 32 個のセンサを配置する必要がある。本報告書で提案する EMAT の常設による減肉監視法を適用する利点の一つは、常設することによる検査コストの効率化にあり、実機適用においては高所や狭所の配管の検査において、高所作業のための足場などを組む必要がない、遠隔計測が求められる。

これらを考慮し、実機環境を模擬した実験装置の構成を Fig. 4.3.2-2 に示す。微小信号を増幅するためのプリアンプをセンサ付近に配置し、パルサーなどのその他の計測器は制御室などの離れた場所に置くことを考慮している。EMAT の交流励磁に用いるパルサーは RITEC Inc. の RPR-4000 を用いた。励磁には最大 800Vpp, 数 MHz の波形を用いた。A/D 変換器は(株)コンテックの DIG-100M1002-PCI, または(株)TFF の TDS2024B を用いた。また A/D 変換器の前段には(株)エヌエフ回路設計ブロックのフィルタ FV-628B またはインサイト(株)のフィルタを挿入し、0.5MHz-5MHz のバンドパスフィルタとして用いた。EMAT は 3 章で用いたものと同じである。

本実験装置は、配管に設置する EMAT の数だけ信号線が存在するが、信号線を切り替えるマルチプレクサを用いることで信号線を最小化することができる。64ch 以上でかつ十分小型の UT 用マルチプレクサが市販されており、その電氣的仕様からわずかな変更で EMAT に使用できると思われる。または多芯ケーブルを用いることで、マルチプレクサを制御室に配置することは可能だと思われるが、本研究は装置開発を主とするものではないので、装置の最適化は行わない。

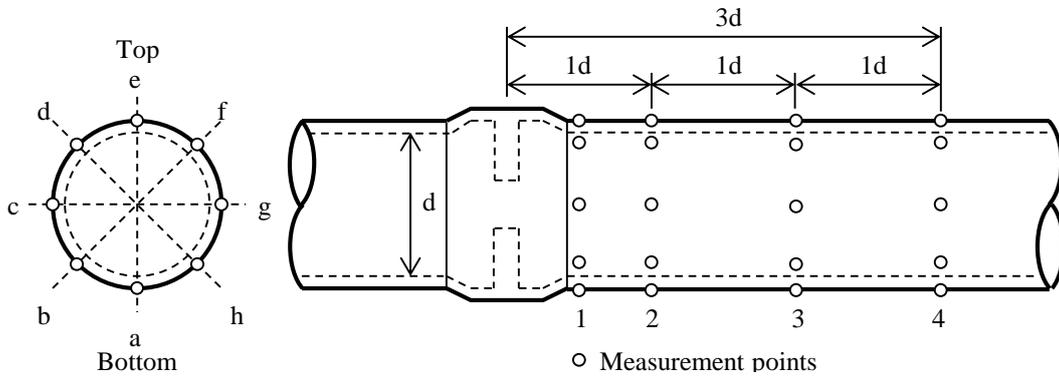


Fig. 4.3.2-1: Measurement points on JSME standard.

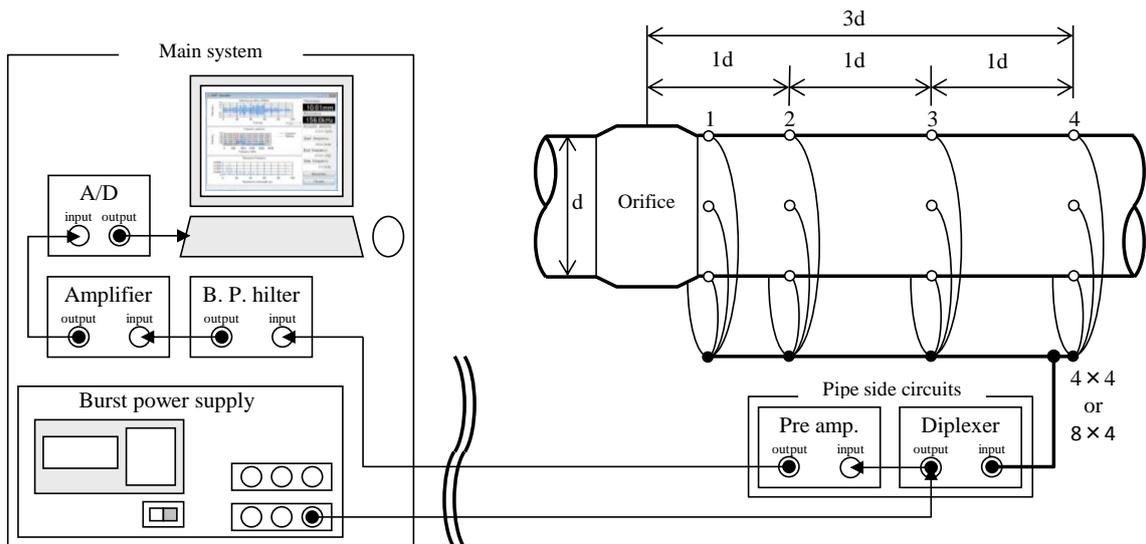


Fig. 4.3.2-2: Experimental setup

4.3.3. 測定結果

最初に、模擬全周 FAC 試験体の呼び径の大きい 6B の測定結果について述べる。減肉は管と同軸に加工しているため、配管厚さは軸対象である。ここでは周方向'e'上の測定点の説明を行う。

減肉幅 60mm, 減肉深さ 0.5mm の測定結果を Table 4.3.3-1, Fig. 4.3.3-1 に示す。減肉は軸方向中央に存在している。両端は健全部になる。EMAT の両端の値は 10.9mm と評価されており、公称厚さとほぼ等しい。最も減肉が進んでいる場所は軸方向位置 100mm 付近でその厚さは 10.4mm である。健全部との差は 0.5mm であり、加工寸法と一致した。また、減肉の開始位置は軸方向位置 40~160mm であり、減肉の軸方向長さは 120mm と評価できる。一方、加工寸法は 160mm である。最大減肉深さが 0.5mm であることから、減肉端はわずかな変化となる。さらに EMAT の分解能を 0.1mm として測定を行っているため、この測定結果は減肉の軸方向長さを評価できていると言える。また、減肉端から減肉中央にかけて減肉面(超音波の反射面)は急になっていくが、共振エネルギーは超音波の反射が困難になるため減衰する。しかし、本試験体ではすべての点において十分な SN 比で $4f$ を評価することができた。また、UT における減肉深さの評価は 0.5mm, 減肉幅は 120mm であった。これは EMAT の評価結果と等しい。すべての測定点における EMAT と UT の評価結果の差の最大値は 0.2mm であった。

減肉幅 60mm, 減肉深さ 1.0mm の測定結果を Table 4.3.3-2, Fig. 4.3.3-2 に示す。EMAT による最大減肉深さの評価は、軸方向位置 120mm における 1.0mm である。減肉は 40~160mm に存在しているため、減肉長さは 120mm である。これは加工寸法とほぼ等しい。また UT による評価結果とも等しい。すべての測定点における EMAT と UT の評価結果の差の最大値は 0.1mm であった。

これにより、呼び径 6B においては、減肉量 0.5mm という初期の FAC の厚さ評価が可能であること、0.5mm の減肉の進展を十分評価できることが確認できた。

Table 4.3.3-1: Results of 6B pipe with 0.5 mm corrosion at 'e' line. (Unit: mm)

| | | | | | | | | |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Axial position | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 |
| UT | 11.0 | 10.9 | 10.7 | 10.6 | 10.5 | 10.5 | 10.6 | 10.7 |
| EMAT | 10.9 | 10.8 | 10.5 | 10.6 | 10.4 | 10.4 | 10.5 | 10.7 |
| Error | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.0 |
| Axial position | 180 | 200 | 220 | | | | | |
| UT | 11.0 | 11.0 | 11.0 | | | | | |
| EMAT | 10.9 | 10.9 | 10.9 | | | | | |
| Error | 0.1 | 0.1 | 0.1 | | | | | |

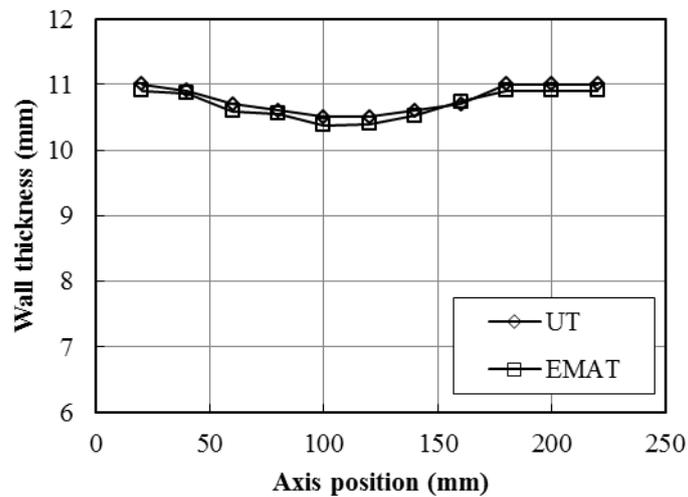


Fig. 4.3.3-1: Estimating sizing results of 6B pipe with 0.5 mm corrosion at 'e' line.

Table 4.3.3-2: Results of 6B pipe with 1.0 mm corrosion at 'e' line. (Unit: mm)

| | | | | | | | | |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Axial position | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 |
| UT | 10.9 | 11.1 | 10.6 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 10.1 | 10.4 |
| EMAT | 11.0 | 11.0 | 10.6 | 10.2 | 10.1 | 10.0 | 10.1 | 10.3 |
| Error | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |
| Axial position | 180 | 200 | 220 | | | | | |
| UT | 10.6 | 10.9 | 10.9 | | | | | |
| EMAT | 10.5 | 10.9 | 11.0 | | | | | |
| Error | 0.1 | 0.0 | 0.1 | | | | | |

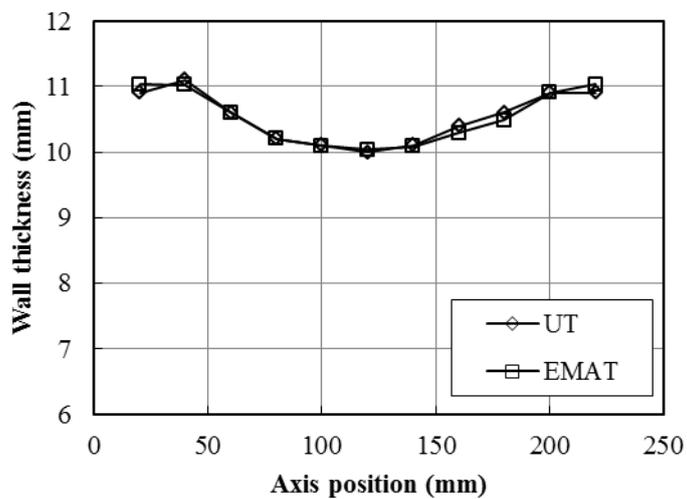


Fig. 4.3.3-2: Estimating sizing results of 6B pipe with 1.0 mm corrosion at 'e' line.

4.3 模擬 FAC 試験体を用いたオリフィス下流減肉の進展測定

次に、模擬全周 FAC 試験体の呼び径の小さい 2B の測定結果について述べる。2B 配管だと、6B と比較するとセンサと超音波の入射面のリフトオフが大きくなる、同じ減肉形状でも小口径管になるほど減肉面が急になる、ことから、より測定が困難になることが予想される。

減肉幅 60mm, 減肉深さ 0.4mm の測定結果を Table 4.3.3-3, Fig. 4.3.3-3 に示す。減肉は軸方向中央に存在している。両端は健全部になる。EMAT の両端の値は 5.2mm と評価された。公称厚さ 0.3mm の差があるが、公差を考慮すれば EMAT の評価結果は健全部の厚さを評価できている。最も減肉が進んでいる場所は軸方向位置 60mm 付近でその厚さは 4.8mm である。健全部との差は 0.4mm であり、加工寸法と一致した。また、減肉の開始位置は軸方向位置 40~90mm であり、減肉の軸方向長さは 50mm と評価できる。加工寸法は 160mm であるが、最大減肉深さが 0.4mm であり、減肉端はわずかな変化となるので、このような評価となった。また、UT における減肉深さの評価は 0.4mm, 減肉幅は 30mm であった。これは EMAT の評価結果とほぼ等しい。すべての測定点における EMAT と UT の評価結果の差の最大値は 0.2mm であった。

減肉幅 60mm, 減肉深さ 0.5mm の測定結果を Table 4.3.3-4, Fig. 4.3.3-4 に示す。EMAT による最大減肉深さの評価は、軸方向位置 60mm における 0.5mm である。減肉は 50~90mm に存在しているので、減肉長さは 40mm である。減肉深さについては加工寸法と等しい。また UT による減肉深さと長さの評価結果と等しい。すべての測定点における EMAT と UT の評価結果の差の最大値は 0.2mm であった。

減肉幅 60mm, 減肉深さ 1.0mm の測定結果を Table 4.3.3-5, Fig. 4.3.3-5 に示す。EMAT による最大減肉深さの評価は、軸方向位置 70mm における 1.0mm である。減肉は 50~90mm に存在しているので、減肉長さは 40mm である。減肉深さについては加工寸法と等しい。また UT による減肉深さと長さの評価結果と等しい。すべての測定点における EMAT と UT の評価結果の差の最大値は 0.2mm であった。

Table 4.3.3-3: Results of 2B pipe with 0.4 mm corrosion at 'e' line. (Unit: mm).

| | | | | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Axial position | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| UT | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 4.8 | 4.7 | 4.7 |
| EMAT | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.2 | 4.8 | 4.8 | 4.9 |
| Error | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.2 |
| Axial position | 90 | 100 | 110 | 120 | | | | |
| UT | 4.9 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | | | | |
| EMAT | 5.1 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | | | | |
| Error | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | | | | |

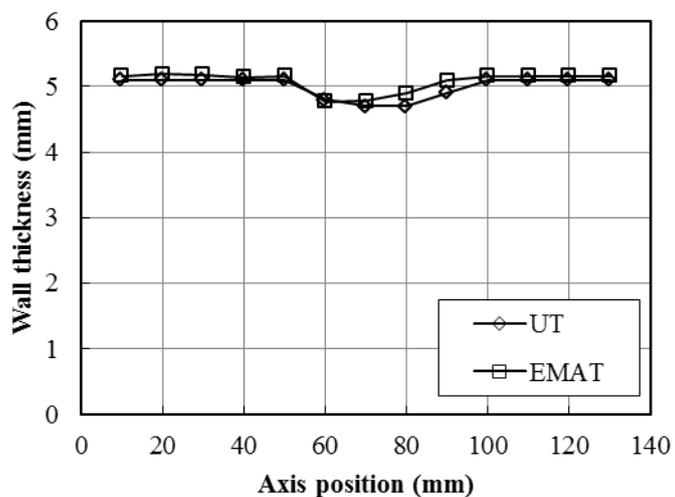


Fig. 4.3.3-3: Estimating sizing results of 2B pipe with 0.4 mm corrosion at 'e' line.

Table 4.3.3-4: Results of 2B pipe with 0.5mm corrosion at 'e' line. (Unit: mm).

| | | | | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Axial position | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| UT | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 4.9 | 4.7 | 4.7 | 4.8 |
| EMAT | 5.3 | 5.2 | 5.3 | 5.3 | 4.9 | 4.8 | 4.8 | 4.9 |
| Error | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Axial position | 90 | 100 | 110 | 120 | | | | |
| UT | 4.9 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | | | | |
| EMAT | 5.0 | 5.5 | 5.5 | 5.4 | | | | |
| Error | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | | | | |

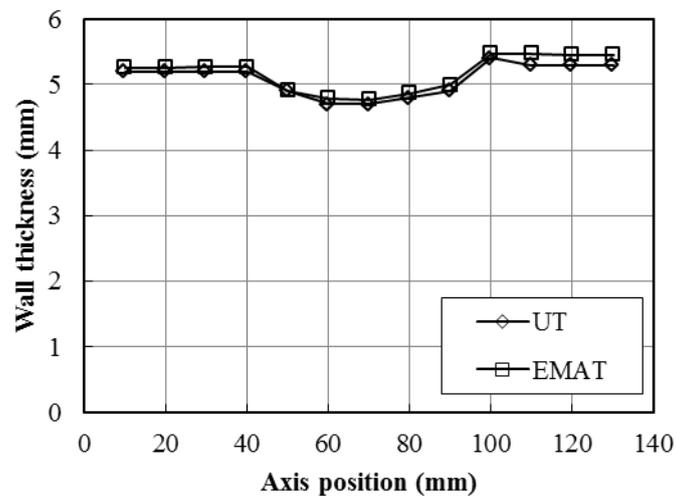


Fig. 4.3.3-4: Estimating sizing results of 2B pipe with 0.5 mm corrosion at 'e' line.

Table 4.3.3-5: Results of 2B pipe with 1.0 mm corrosion at 'e' line. (Unit: mm).

| | | | | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Axial position | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| UT | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.0 | 4.5 | 4.3 | 4.1 | 4.2 |
| EMAT | 5.1 | 5.1 | 5.2 | 5.2 | 4.6 | 4.2 | 4.1 | 4.2 |
| Error | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 |
| Axial position | 90 | 100 | 110 | 120 | | | | |
| UT | 4.6 | 5.1 | 5.3 | 5.3 | | | | |
| EMAT | 4.6 | 5.1 | 5.3 | 5.3 | | | | |
| Error | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | | | |

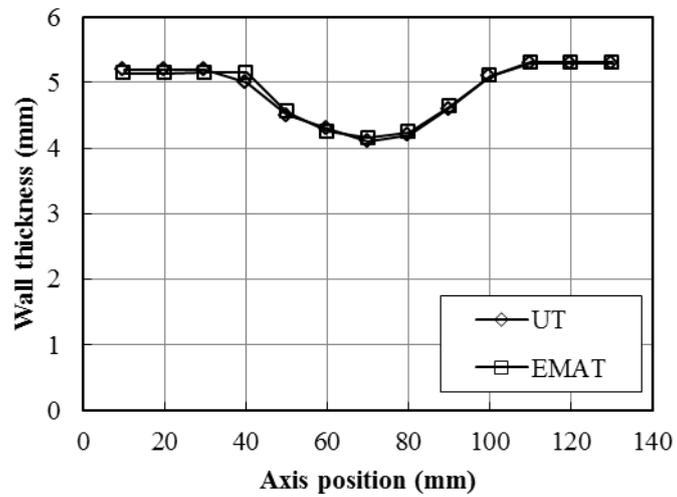


Fig. 4.3.3-5: Estimating sizing results of 2B pipe with 1.0 mm corrosion at 'e' line.

4.3 模擬 FAC 試験体を用いたオリフィス下流減肉の進展測定

次に、2B配管の模擬全周 FAC 試験体で、減肉幅が 30mm と 120mm の測定結果を示す。最初に減肉幅 30mm、減肉深さ 1.0mm の測定結果を Table 4.3.3-6, Fig. 4.3.3-6 に示す。減肉幅 30mm は減肉幅が狭いので超音波の入射面に対する減肉面の角度が大きく、測定が困難になることが予想される。しかし、すべての測定点で Δf を得ることができた。減肉は、軸方向 700mm～720mm に確認できる。また軸方向 720mm 付近が最も減肉が進んでおり、健全部の厚さ 5.3mm(周方向 c, 軸方向 650mm)に対して、減肉部の厚さ 4.2mm(周方向 c, 軸方向 720mm)であり、減肉深さは 1.1mm となる。これは加工寸法とほぼ同一である。UT と比較すると、減肉は軸方向 700mm～720mm に確認でき、減肉深さは EMAT と同じ位置において 1.1mm であった。これは EMAT の測定結果と同じである。

減肉幅 60mm、減肉深さ 1.0mm の測定結果を Table 4.3.3-7, Fig. 4.3.3-7 に示す。減肉は、軸方向 700mm～760mm に確認できる。旋盤で軸対象の減肉を加工しているが、配管自体が歪んでいるため、軸方向位置が同じでも周方向の場所によって厚さが異なる場合があるが、軸方向 720mm 付近が最も減肉が進んでおり、減肉深さは 1.1mm となっていることが確認できる。

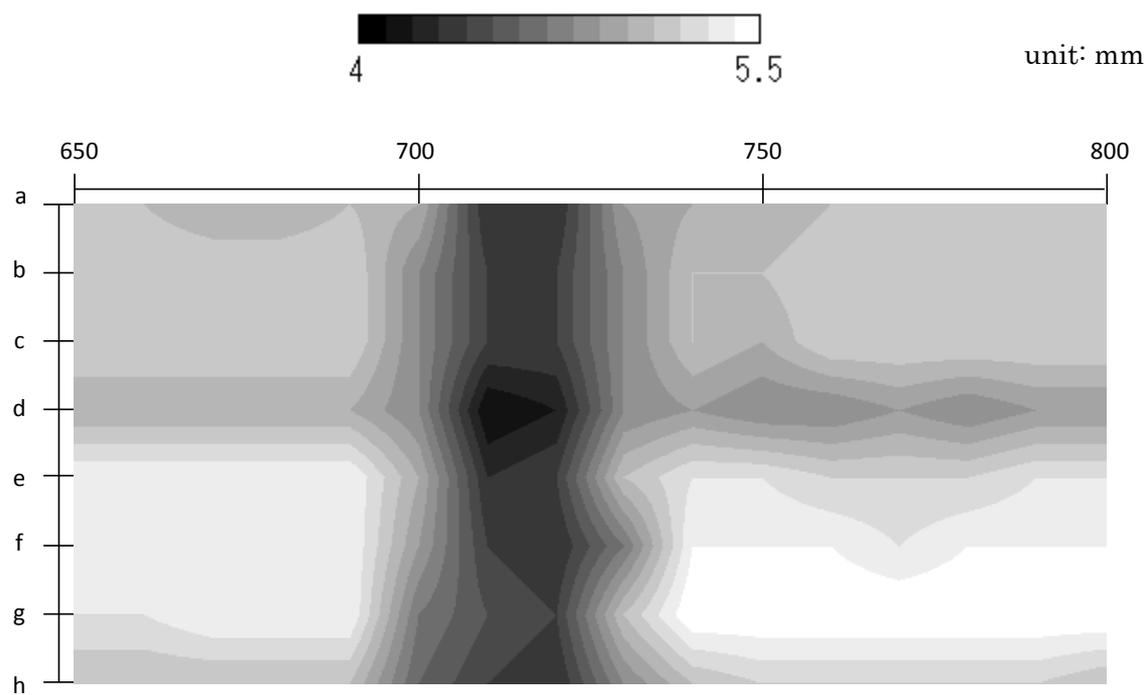
減肉幅 120mm、減肉深さ 0.5mm の測定結果を Table 4.3.3-8, Fig. 4.3.3-8 に示す。この試験体の減肉量はわずかであり、減肉端においては使用した測定条件に由来する分解能である 0.1mm をかなり下回る。配管が歪んでいるので旋盤のバイトが配管に接触しない場所もあった。したがって、この試験体は加工寸法通りの減肉範囲になっていない可能性が高い。確認できた減肉位置は、軸方向 720mm～760mm となっており、加工寸法とは異なるが、これはそのような理由が原因であると考えられる。減肉深さについては、軸方向 780mm 付近が最も減肉が進んでおり、減肉深さは 0.4mm となっていることが確認できる。UT と EMAT の厚さ測定結果の最も大きな差は 0.4mm であった。

Table 4.3.3-6: Results of 2B pipe with mock-up FAC. (Section a to d)

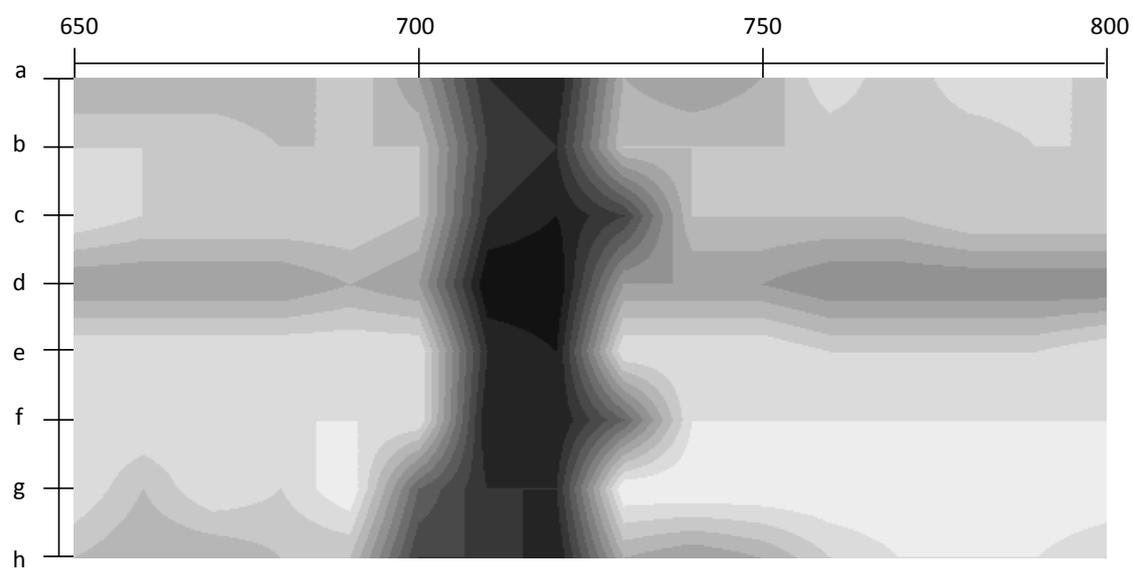
| Axis | a | | b | | c | | d | |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT |
| 650 | 5.1 | 5.1 | 5.3 | 5.3 | 5.4 | 5.3 | 5.4 | 5.3 |
| 660 | 5.1 | 5.0 | 5.3 | 5.1 | 5.4 | 5.3 | 5.4 | 5.3 |
| 670 | 5.1 | 5.0 | 5.4 | 5.3 | 5.4 | 5.3 | 5.4 | 5.3 |
| 680 | 5.1 | 5.1 | 5.4 | 5.2 | 5.4 | 5.3 | 5.4 | 5.3 |
| 690 | 5.1 | 5.1 | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.4 | 5.3 |
| 700 | 4.6 | 4.4 | 4.7 | 4.6 | 4.9 | 5.3 | 5.0 | 5.3 |
| 710 | 4.4 | 4.4 | 4.5 | 4.3 | 4.4 | 4.2 | 4.3 | 4.3 |
| 720 | 4.3 | 4.2 | 4.4 | 4.3 | 4.3 | 4.2 | 4.4 | 4.2 |
| 730 | 4.8 | 5.0 | 5.1 | 5.4 | 4.7 | 4.6 | 5.1 | 5.3 |
| 740 | 5.1 | 4.9 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.3 |
| 750 | 5.2 | 5.0 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.3 |
| 760 | 5.2 | 5.2 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.2 | 5.2 |
| 770 | 5.2 | 5.3 | 5.5 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.2 |
| 780 | 5.2 | 5.3 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.2 | 5.2 |
| 790 | 5.2 | 5.3 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.2 |
| 800 | 5.1 | 5.2 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.3 | 5.3 | 5.3 |

Table 4.3.3-6: Results of 2B pipe with mock-up FAC. (Section e to h)

| Axis | e | | f | | g | | h | |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT |
| 650 | 5.0 | 4.9 | 5.2 | 5.3 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.0 |
| 660 | 5.0 | 4.9 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.0 |
| 670 | 5.0 | 4.9 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.0 | 5.0 |
| 680 | 5.0 | 4.9 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.0 | 5.0 |
| 690 | 5.0 | 5.0 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 5.2 |
| 700 | 4.8 | 4.9 | 4.8 | 5.1 | 4.8 | 5.1 | 5.0 | 4.9 |
| 710 | 4.1 | 4.1 | 4.4 | 4.3 | 4.4 | 4.4 | 4.3 | 4.3 |
| 720 | 4.2 | 4.1 | 4.4 | 4.2 | 4.4 | 4.3 | 4.3 | 4.2 |
| 730 | 4.8 | 4.9 | 4.8 | 4.4 | 4.8 | 5.1 | 4.9 | 5.0 |
| 740 | 4.9 | 4.9 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 4.9 |
| 750 | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 5.0 |
| 760 | 4.8 | 4.8 | 5.2 | 5.1 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 5.3 |
| 770 | 4.9 | 4.8 | 5.2 | 5.1 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 5.1 |
| 780 | 4.8 | 4.8 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.2 | 5.3 |
| 790 | 4.9 | 4.8 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.3 |
| 800 | 4.9 | 4.8 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.1 |



(a) UT



(b) EMAT

Fig. 4.3.3-6: Estimating sizing results of 2B pipe with mock-up FAC.

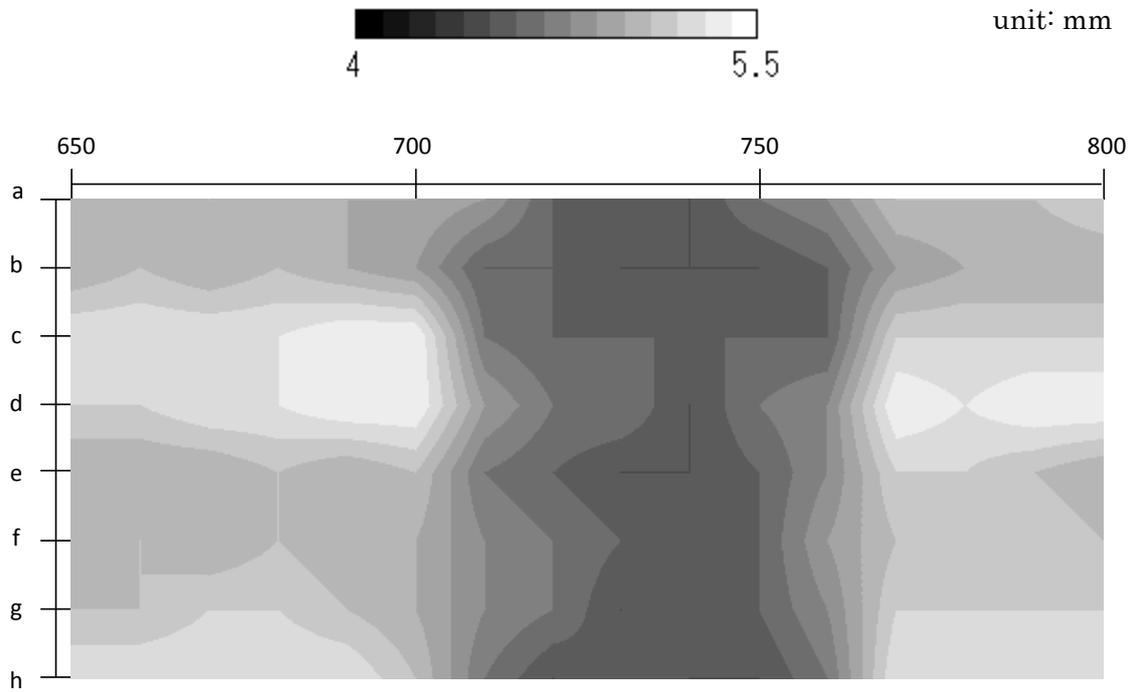
Table 4.3.3-7: Results of 2B pipe with mock-up FAC. (Section a to d)

| Axis | a | | b | | c | | D | |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT |
| 650 | 5.3 | 5.4 | 5.1 | 5.2 | 5.0 | 5.1 | 5.0 | 5.0 |
| 660 | 5.3 | 5.4 | 5.1 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 5.0 |
| 670 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.1 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| 680 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 5.1 | 5.0 |
| 690 | 5.3 | 5.1 | 5.1 | 5.2 | 5.0 | 5.1 | 5.0 | 5.0 |
| 700 | 5.1 | 5.4 | 5.0 | 5.2 | 5.0 | 5.0 | 5.1 | 5.0 |
| 710 | 4.7 | 4.5 | 4.8 | 4.6 | 4.8 | 4.6 | 4.7 | 4.6 |
| 720 | 4.5 | 4.5 | 4.7 | 4.5 | 4.7 | 4.6 | 4.6 | 4.6 |
| 730 | 4.6 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.6 | 4.5 | 4.5 | 4.5 |
| 740 | 4.5 | 4.5 | 4.6 | 4.5 | 4.6 | 4.5 | 4.5 | 4.5 |
| 750 | 4.5 | 4.7 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 4.6 |
| 760 | 4.7 | 4.8 | 4.8 | 4.5 | 4.9 | 4.7 | 4.8 | 4.7 |
| 770 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 5.2 | 5.1 |
| 780 | 5.3 | 5.4 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 5.2 | 5.0 |
| 790 | 5.3 | 5.4 | 5.2 | 5.1 | 5.2 | 5.0 | 5.1 | 5.0 |
| 800 | 5.3 | 5.4 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 5.1 |

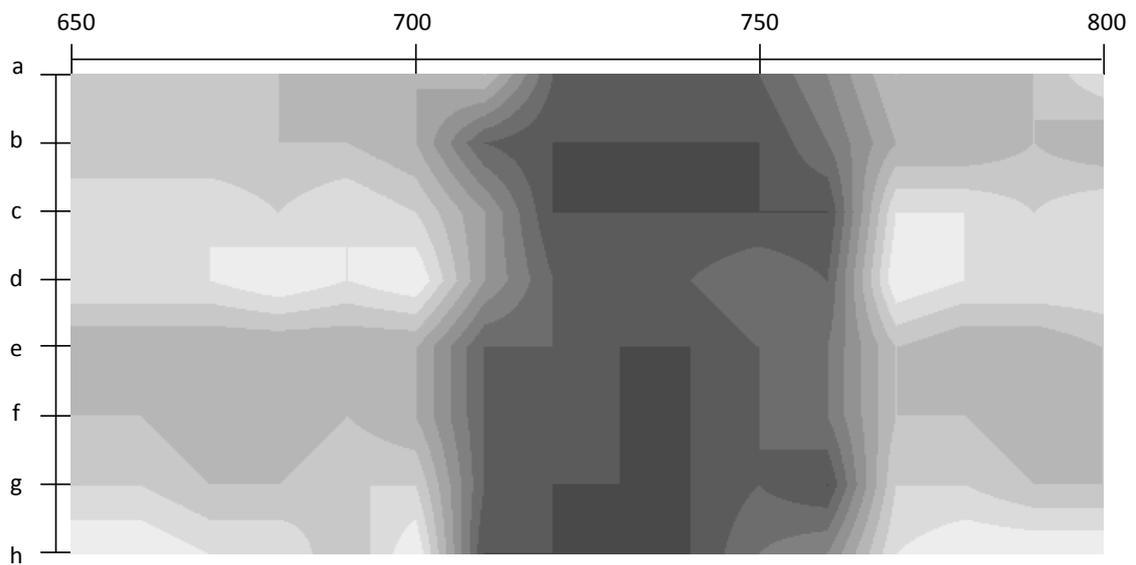
Table 4.3.3-7: Results of 2B pipe with mock-up FAC. (Section e to h)

| Axis | e | | f | | g | | h | |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT |
| 650 | 5.2 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.0 | 5.1 | 5 | 5.1 |
| 660 | 5.2 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.1 | 5.1 | 5 | 5.1 |
| 670 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5 | 5.1 | 5.1 | 5.1 |
| 680 | 5.3 | 5.4 | 5.3 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 5.1 |
| 690 | 5.4 | 5.3 | 5.4 | 5.3 | 5.0 | 5.1 | 5.0 | 5.0 |
| 700 | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 5.2 | 4.9 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| 710 | 4.9 | 4.9 | 4.7 | 4.9 | 4.6 | 4.6 | 4.9 | 5.1 |
| 720 | 4.7 | 4.6 | 4.6 | 4.5 | 4.6 | 4.5 | 4.6 | 4.6 |
| 730 | 4.7 | 4.6 | 4.6 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.6 | 4.6 |
| 740 | 4.5 | 4.6 | 4.6 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.6 |
| 750 | 4.7 | 4.7 | 4.6 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.7 | 4.6 |
| 760 | 4.8 | 4.6 | 4.6 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.8 |
| 770 | 5.4 | 5.4 | 5.2 | 5.3 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.1 |
| 780 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.3 | 5.0 | 5.0 | 5.1 | 5.0 |
| 790 | 5.4 | 5.3 | 5.2 | 5.2 | 5.0 | 5.1 | 5.1 | 5.1 |
| 800 | 5.4 | 5.3 | 5.2 | 5.3 | 5.0 | 5 | 5.2 | 5.3 |

4.3 模擬 FAC 試験体を用いたオリフィス下流減肉の進展測定



(a) UT



(b) EMAT

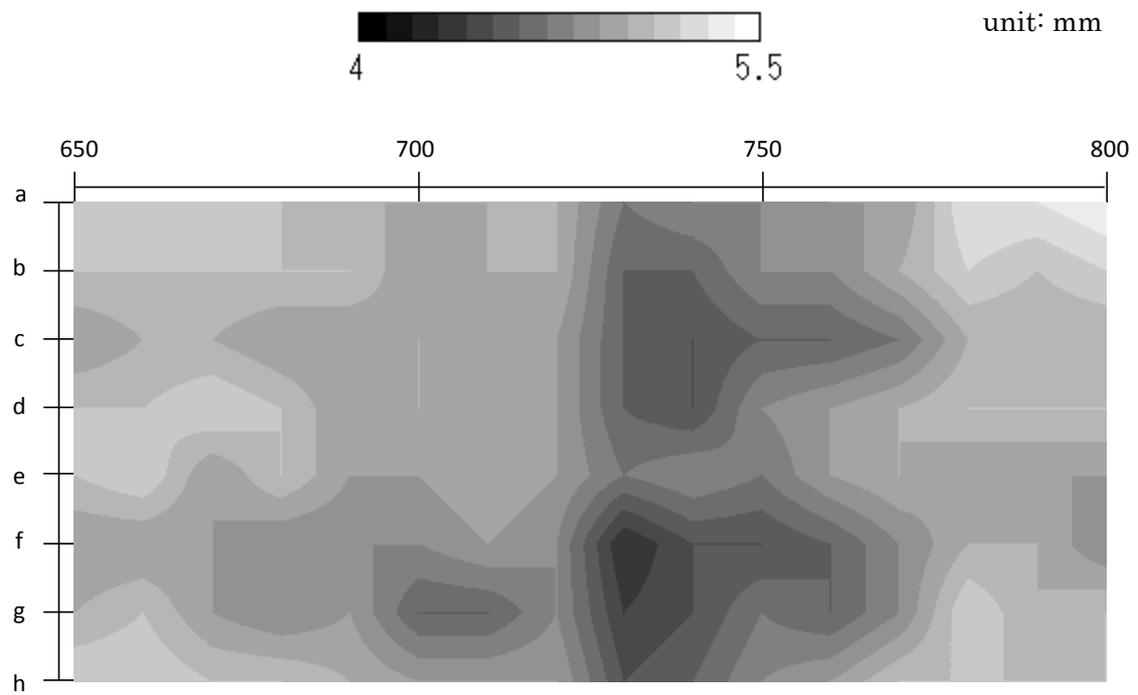
Fig. 4.3.3-7: Estimating sizing results of 2B pipe with mock-up FAC.

Table 4.3.3-8: Results of 2B pipe with mock-up FAC. (Section a to d)

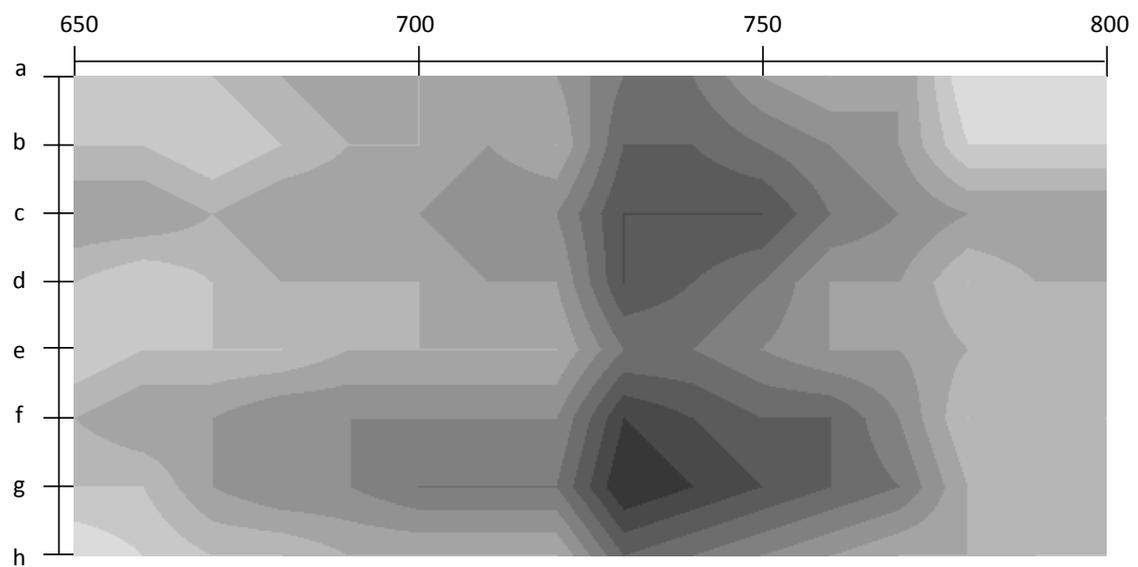
| Axis | a | | b | | c | | d | |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT |
| 650 | 4.9 | 5.0 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.8 | 4.9 | 5.0 |
| 660 | 4.9 | 5.0 | 4.6 | 4.7 | 4.9 | 4.8 | 5.0 | 5.0 |
| 670 | 4.9 | 5.0 | 4.8 | 4.7 | 4.8 | 4.8 | 4.9 | 5.0 |
| 680 | 4.5 | 4.6 | 4.4 | 4.3 | 4.3 | 4.4 | 4.7 | 4.7 |
| 690 | 4.6 | 4.7 | 4.5 | 4.4 | 4.5 | 4.5 | 4.8 | 4.7 |
| 700 | 4.8 | 4.8 | 4.7 | 4.5 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 |
| 710 | 4.9 | 4.9 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 4.9 | 4.9 |
| 720 | 5.1 | 5.0 | 4.8 | 4.7 | 4.8 | 4.8 | 5.0 | 4.9 |
| 730 | 5.1 | 5.0 | 5.2 | 5.0 | 5.0 | 5.1 | 4.9 | 5.0 |
| 740 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 4.9 | 5.0 |
| 750 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 4.8 | 5.1 | 4.9 | 5.0 |
| 760 | 5.2 | 5.3 | 5.0 | 5.1 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.2 |
| 770 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 4.9 | 4.9 | 5.2 | 5.1 |
| 780 | 5.1 | 5.1 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 5.1 |
| 790 | 5.1 | 5.1 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 5.1 | 5.1 |
| 800 | 5.0 | 5.0 | 4.9 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.9 | 5.0 |

Table 4.3.3-8: Results of 2B pipe with mock-up FAC. (Section e to h)

| Axis | e | | f | | g | | h | |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT |
| 650 | 5.0 | 5.0 | 5 | 4.9 | 4.9 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| 660 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 4.8 | 5.0 | 4.9 | 5.0 | 4.9 |
| 670 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 4.8 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 4.9 |
| 680 | 4.6 | 4.5 | 4.6 | 4.5 | 4.6 | 4.6 | 4.7 | 4.7 |
| 690 | 4.5 | 4.6 | 4.5 | 4.5 | 4.6 | 4.6 | 4.8 | 4.7 |
| 700 | 4.8 | 4.7 | 4.6 | 4.5 | 4.8 | 4.7 | 4.8 | 4.9 |
| 710 | 4.9 | 4.9 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.8 | 4.9 | 5.0 |
| 720 | 5.0 | 4.9 | 4.7 | 4.8 | 5.0 | 4.9 | 4.9 | 4.9 |
| 730 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 4.9 | 5.2 | 5.2 | 5.3 | 5.3 |
| 740 | 5.1 | 5.0 | 5.0 | 4.9 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.3 |
| 750 | 5.1 | 5.0 | 5.0 | 4.9 | 5.2 | 5.2 | 5.4 | 5.3 |
| 760 | 5.1 | 5.1 | 4.9 | 4.9 | 5.1 | 5.1 | 5.2 | 5.2 |
| 770 | 5.1 | 5.2 | 5.0 | 4.9 | 5.1 | 5.1 | 5.2 | 5.2 |
| 780 | 5.2 | 5.1 | 5.0 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.1 | 5.1 |
| 790 | 5.1 | 5.0 | 4.9 | 4.9 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.0 |
| 800 | 4.9 | 5.0 | 4.9 | 4.9 | 5.1 | 5.0 | 5.0 | 4.9 |



(a) UT



(b) EMAT

Fig. 4.3.3-8: Estimating sizing results of 2B pipe with mock-up FAC.

4.3 模擬 FAC 試験体を用いたオリフィス下流減肉の進展測定

次に、模擬部分 FAC 試験体の測定結果を Table 4.3.3-9, Fig. 4.3.3-9 に示す。軸方向位置 650~700mm, 830~850mm の健全部においては、UT と EMAT の診断結果はほぼ一致している。最も減肉が進んでいる減肉中央部においても、ほぼ一致している。

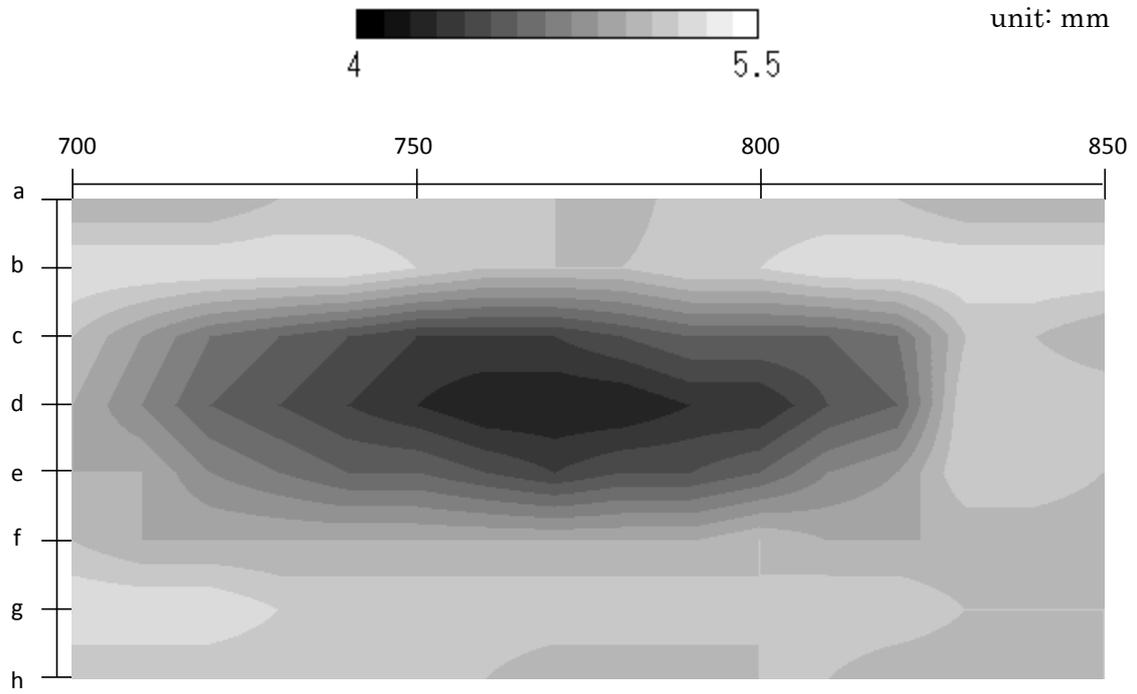
一方で、測定点によっては UT と EMAT の差が 0.5mm 程度になっているところがある。特に減肉の際の部分で差が大きい。UT で該当箇所を測定したとき、診断結果にムラがあることを確認している。これは減肉面に加工によって出来た凹凸があり、測定位置によってその差が出ているからだと思われる。UT については測定点上で探触子を移動させたとき、もっとも減肉量が多い位置を診断結果としている。一方で、EMAT は共振法を用いており、今回 UT で用いたパルスエコー法と比較して測定時間が長いことから、測定点も多いこともあり、測定点上で探触子を動かさずに、最初の測定結果を診断結果としている。EMAT も UT と同様、同一測定点上において、もっとも減肉量が多い位置を探すことで、UT と同様の結果を得られる可能性がある。

Table 4.3.3-9: Results of 2B pipe with spot corrosion. (Section a to d)

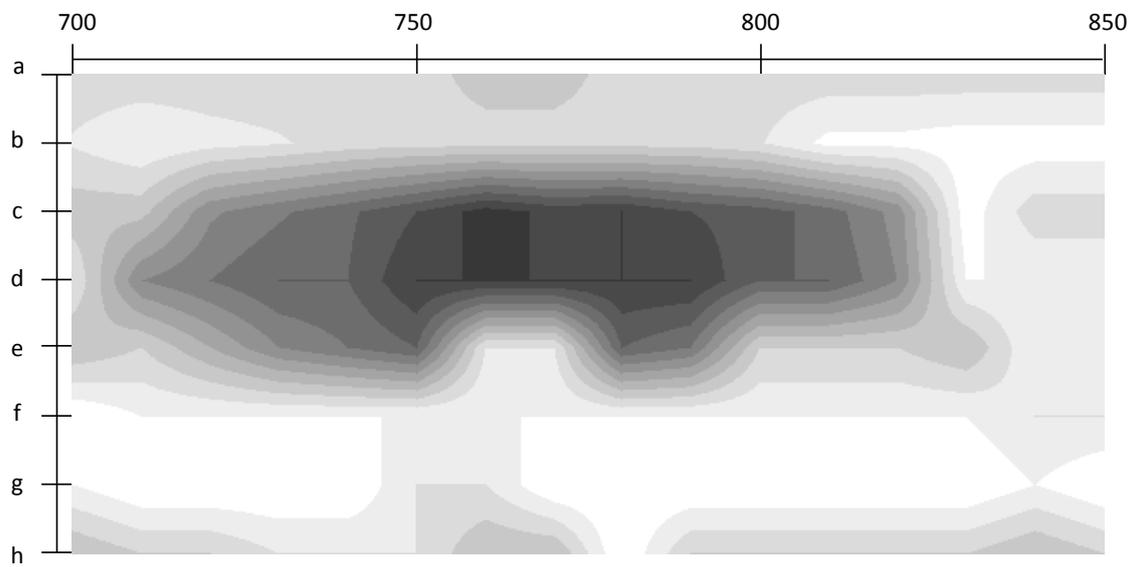
| Axis | a | | b | | c | | d | |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT |
| 700 | 5.1 | 5.1 | 5.3 | 5.4 | 5.1 | 5.5 | 5.0 | 5.1 |
| 710 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.5 | 5.0 | 5.4 | 5.0 | 5.2 |
| 720 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.5 | 5.0 | 5.4 | 4.8 | 5.0 |
| 730 | 5.1 | 5.3 | 5.2 | 5.5 | 5.0 | 5.4 | 4.7 | 4.8 |
| 740 | 5.1 | 5.3 | 5.2 | 5.5 | 5.0 | 5.4 | 4.6 | 4.7 |
| 750 | 5.1 | 5.3 | 5.2 | 5.3 | 5.0 | 5.4 | 4.6 | 4.6 |
| 760 | 5.1 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.0 | 5.4 | 4.5 | 5.3 |
| 770 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.5 | 5.0 | 5.4 | 4.4 | 5.3 |
| 780 | 5.0 | 5.5 | 5.2 | 5.5 | 5.0 | 5.4 | 4.5 | 4.6 |
| 790 | 5.0 | 5.2 | 5.2 | 5.5 | 5.0 | 5.4 | 4.5 | 4.7 |
| 800 | 5.1 | 5.2 | 5.1 | 5.5 | 5.1 | 5.4 | 4.6 | 5.2 |
| 810 | 5.1 | 5.2 | 5.2 | 5.5 | 5.0 | 5.4 | 4.8 | 5.2 |
| 820 | 5.0 | 5.2 | 5.2 | 5.5 | 5.0 | 5.4 | 4.9 | 5.2 |
| 830 | 5.0 | 5.2 | 5.1 | 5.5 | 5.0 | 5.4 | 5.2 | 5.1 |
| 840 | 5.0 | 5.1 | 5.1 | 5.4 | 5.0 | 5.3 | 5.2 | 5.4 |
| 850 | 5.1 | 5.2 | 5.1 | 5.5 | 5.0 | 5.3 | 5.1 | 5.4 |

Table 4.3.3-9: Results of 2B pipe with spot corrosion. (Section e to h)

| Axis | e | | f | | g | | h | |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT | UT | EMAT |
| 700 | 5.0 | 5.3 | 5.1 | 5.1 | 5.3 | 5.3 | 5.0 | 5.2 |
| 710 | 4.8 | 4.8 | 4.9 | 5.1 | 5.3 | 5.4 | 5.0 | 5.2 |
| 720 | 4.6 | 4.7 | 4.7 | 4.8 | 5.3 | 5.3 | 5.0 | 5.2 |
| 730 | 4.5 | 4.6 | 4.6 | 4.7 | 5.3 | 5.3 | 5.1 | 5.2 |
| 740 | 4.4 | 4.6 | 4.5 | 4.6 | 5.3 | 5.3 | 5.1 | 5.2 |
| 750 | 4.3 | 4.4 | 4.4 | 4.5 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.2 |
| 760 | 4.2 | 4.4 | 4.4 | 4.6 | 5.1 | 5.2 | 5.2 | 5.2 |
| 770 | 4.2 | 4.4 | 4.4 | 4.4 | 5.1 | 5.2 | 5.1 | 5.2 |
| 780 | 4.2 | 4.4 | 4.5 | 4.4 | 5.1 | 5.2 | 5.0 | 5.2 |
| 790 | 4.3 | 4.4 | 4.6 | 4.5 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.2 |
| 800 | 4.3 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 5.2 | 5.3 | 5.1 | 5.2 |
| 810 | 4.5 | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 5.3 | 5.4 | 5.1 | 5.2 |
| 820 | 4.6 | 4.8 | 4.7 | 4.8 | 5.3 | 5.4 | 5.1 | 5.2 |
| 830 | 5.2 | 5.4 | 5.1 | 5.5 | 5.3 | 5.5 | 5.0 | 5.2 |
| 840 | 5.2 | 5.4 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.5 | 5.0 | 5.2 |
| 850 | 5.2 | 5.4 | 5.0 | 5.2 | 5.3 | 5.5 | 5.0 | 5.2 |



(a) UT



(b) EMAT

Fig. 4.3.3-9: Estimating sizing results of 2B pipe with spot corrosion.

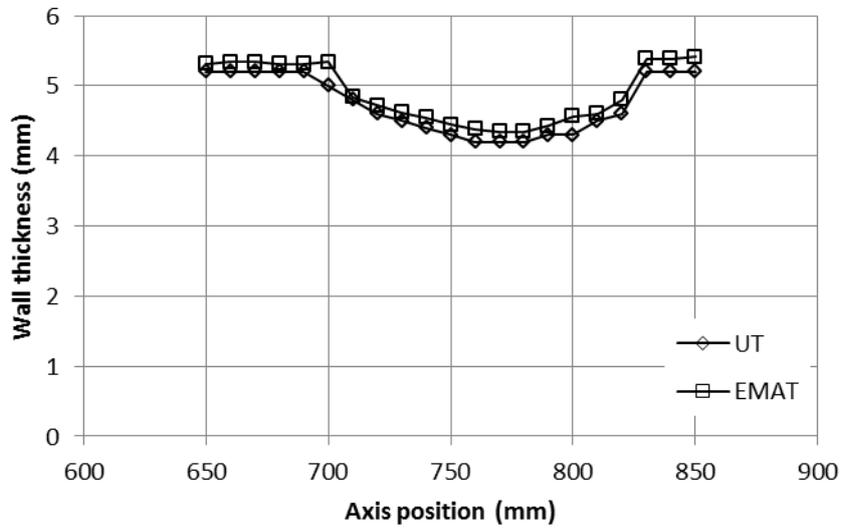


Fig. 4.3.3-7: Profile of 2B pipe with spot corrosion at cir. "a".

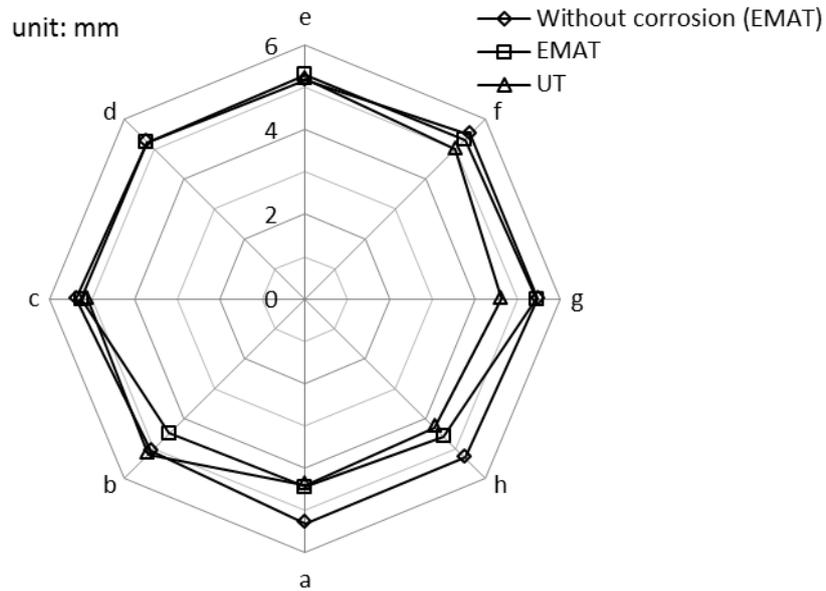
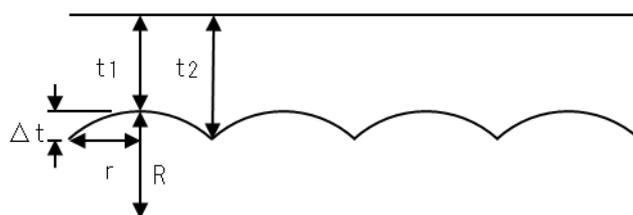


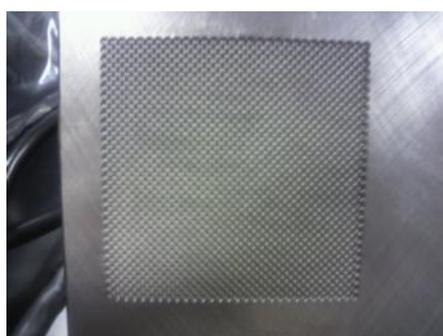
Fig. 4.3.3-8: Profile of 2B pipe with spot corrosion at axis 750 mm.

4.4. FAC における鱗片模様についての考察

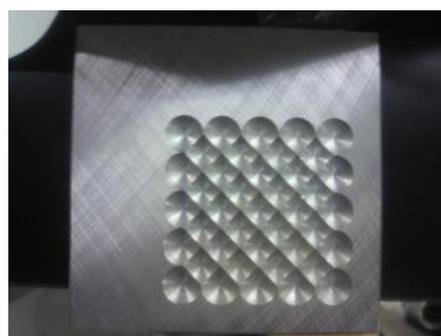
本節では、FAC 表面に生じる鱗片模様が、EMAT の測定に与える影響について検討を行う。これについては以下の2つの問題点について確認を行う。1つ目は、減肉面の凹凸が信号に与える影響、2つ目は最も減肉が進んでいる箇所の厚さの評価、である。Fig. 4.3.1-3 は FAC のミクロ的な形状を模擬した試験体（以下、模擬鱗片試験体）である。これは、減肉面に生じる鱗片模様を模擬している。平板にボールエンドミルで隙間なく球状の窪みを加工している。材質は SS400、健全部の厚さは 10mm で、使用したエンドミルは半径 1,50mm、切削深さ 1.0mm である。したがって、減肉部の最小厚さは両試験体ともに 9.0mm である。模擬鱗片の形状を Fig. 18(b)に示す。模擬鱗片試験体は球状の加工面を持ち、球の径を R 、加工面直上から見たときの加工穴の半径を r 、加工穴の最も深い位置の板厚を t とした。実際の鱗片は、 $r = 10\text{mm}$ よりも十分小さいと思われる。測定装置は 4.3 と同じものを用いる。



(a) Side view of mock-up



(b) Bottom view (t09R50r10)



(c) Bottom view (t09R50r10)

Fig. 4.3.1-4: Mock-up of scallops.

模擬鱗片試験体で得られた共振スペクトルを Fig. 4.3.3-8,9 に示す。t09R1r1 は板厚を評価する Δf が明確に確認できる。これは減肉面に凹凸があると、Fig. 4.3.3-10(a) に示すように、傾きが大きい場合は、超音波は入射面に戻って来ず、凹凸の凸部頂上付近のように、入射面に対して平行な部分でのみ超音波は戻ってくるためと考えられる。一方、t09R50r10 では Δf を確認できない。Fig. 4.3.3-10 (b) のように全体にわたって傾きが緩やかな場合は、厚さの異なる位置で、超音波が入射面まで戻ってきており、共振が発生しないことが予想される。鱗片の形状によって測定の可否が分かれるが、以上により、測定可能な場合の測定結果は、減肉の最も進んだ箇所の板厚を評価している可能性が高いと言える。UT でも同様なことがいえるが、UT のセンサ面積は EMAT に比べて十分小さいことから、鱗片の影響を受けにくい。鱗片の影響を小さくするには、信号強度を維持しつつ、UT と同程度にセンサ面積は小さい方が好ましい。一方で、実際の鱗片に近い $r=1\text{mm}$ の試験体において良好な測定結果を得られたことから、起こりうる鱗片模様をさらに検討する必要があるが、鱗片状の減肉面においては、現状の EMAT 形状で良好な測定結果が得られることが期待できる。

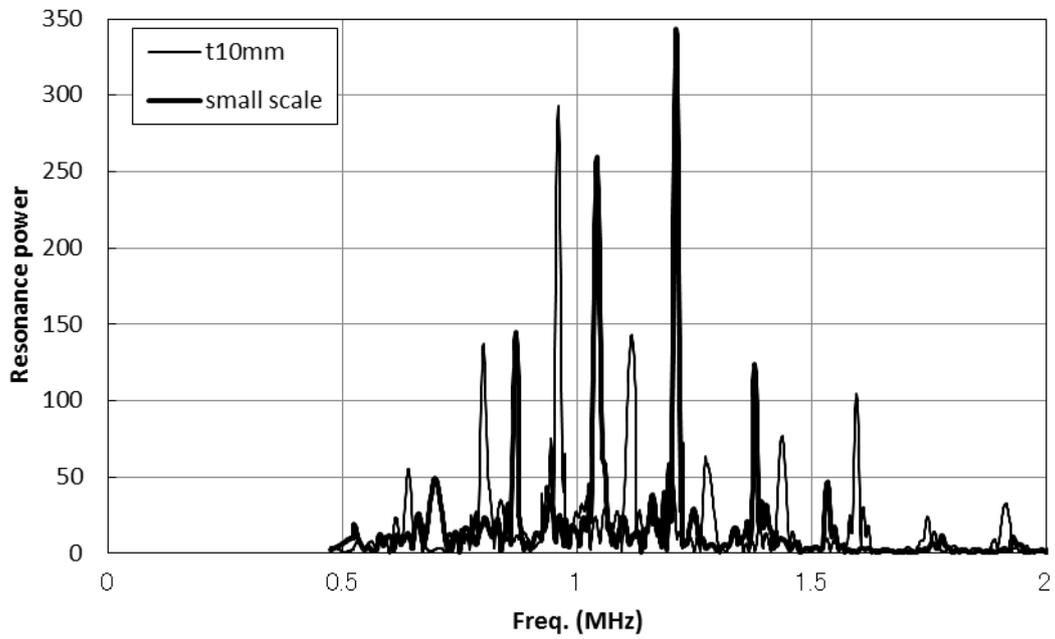


Fig. 4.3.3-9: Frequency spectrum of resonance waveform with small scale. Small scale's Δf is 178kHz.

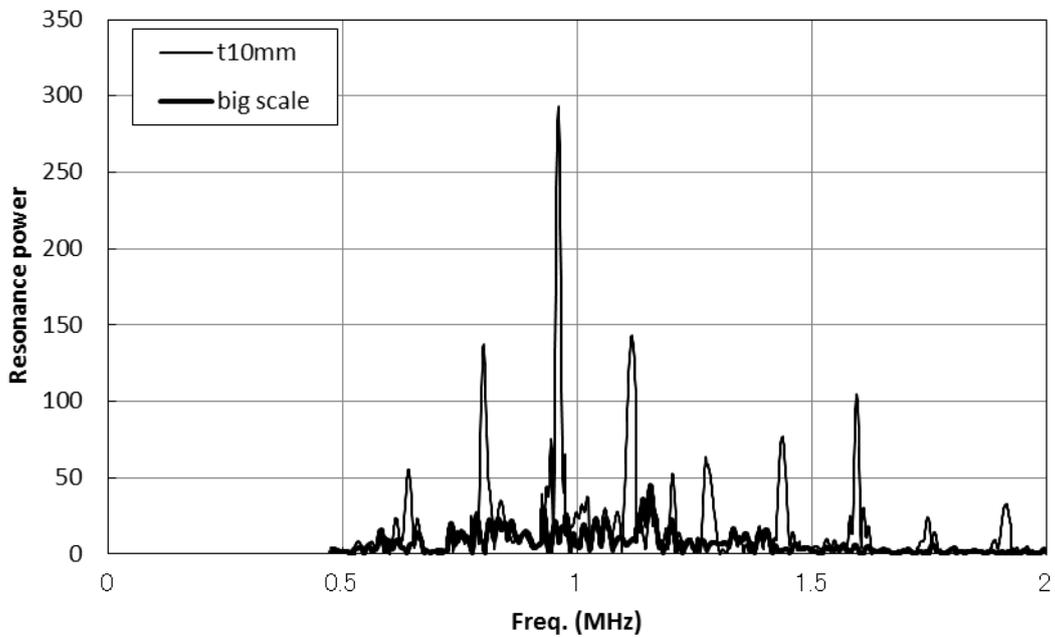


Fig. 4.3.3-10: Frequency spectrum of resonance waveform with big scale.

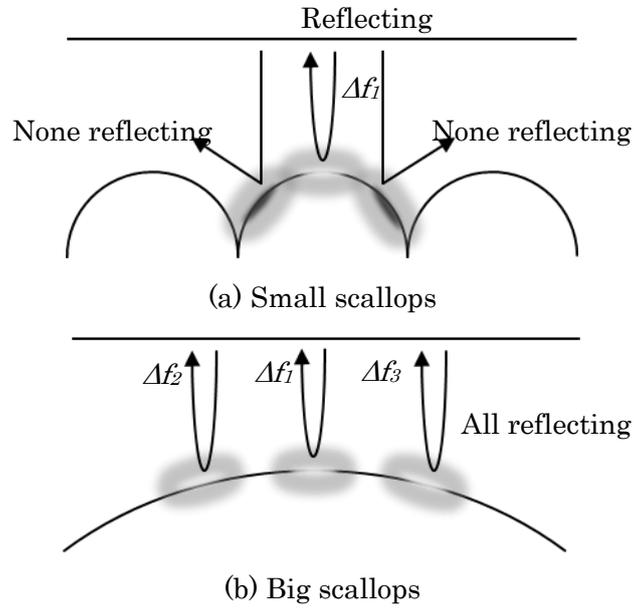


Fig. 4.3.3-11: Reflection on scallops.

4.5. 結言

本章では、減肉形状のマクロ的な模擬を配管試験体によって、ミクロ的な模擬(減肉面の鱗片状の凹凸による応答)を平板試験体によって分けて行い、EMAT が FAC によるわずかな減肉の変化を捉えられることを実験から確認した。得られた具体的な成果を下記に記す。

使用した EMAT の測定レンジが 20mm 以上あり、また厚さ分解能が 0.1mm 以下であることを確認した。これは従来の圧電素子型探触子を用いた手法と同等の性能である。

FAC のマクロ的な形状を模擬した模擬全周 FAC 試験体と、模擬部分 FAC 配管試験体を作成した。配管径が小さくなると、超音波の入射面の曲率が大きくセンサのリフトオフが大きくなること、また減肉端から減肉中央にかけて減肉面(超音波の反射面)は急になるので、測定が困難になることが予想された。しかし、本試験体ではすべての測定点において十分な SN 比で $4f$ を測定することができ、0.1mm の僅かな変化を評価することができた。その測定結果は UT とほぼ同じであった。FAC の特徴である緩やかなカーブを持つ減肉と EMAT の相性は良い。今回用いた 2B 配管において、十分な SN 比で UT とほぼ同様の測定結果が得られたことから、2B 配管以上で同様な結果が得られることが期待できる。

FAC のミクロ的な形状を模擬した鱗片試験体を作成した。鱗片の形状により、測定可否が分かれるが、より実際の鱗片に近い細かい鱗片模様であれば、実機適用の可能性は高いと考えられる。

以上のことから、EMAT は FAC の減肉率を評価可能な厚さ測定分解能を持っており、それは UT と同等であることを確認した。

一方で、1点当たりの測定時間が 40 分ほどであり、測定点が多いと必要な時間が長くなる。これでは時間がかかるので、厚さ測定分解能を落とさずに短時間で測定を行う手法が求められる。

第5章 実機 FAC への適用

5.1. 緒言

実機適用には現実的な測定時間と、より複雑な減肉形状への適用が求められる。前章で述べた共振法は、厚さ測定分解能は十分であるが、原理的に測定時間がかかるためその改善が必要である。また EMAT はセンサ有効面積が比較的大きいため、複雑な減肉形状における厚さ評価の有用性が懸念される。

そこで本章では、最初に現実的な時間で配管厚さを測定可能な共振法を提案し、次に発電プラントへ機材を持ち込み、FAC が生じた実機配管で EMAT による配管厚さ測定を行い、EMAT の有用性を評価する。

5.2. 実機適用のための短時間測定の提案

5.2.1. 探触子のインピーダンス特性を利用した共振周波数測定法

前章で共振法の厚さ測定分解能が十分であることを確認した。実機適用において問題になるのが、要求される精密さを実現するのに必要な時間コストが大きいことである。共振法において、1か所の厚さ測定に必要な時間は要求される測定分解能に依存する。測定分解能は励磁周波数の掃引間隔に依存するため、 Δf より十分広い周波数域を細かく周波数を変えて励磁する必要がある、1か所の測定に千回程度の励磁、検出、演算が必要になる。我々の測定系では1点の測定に約40分かかった。そこで本節では短時間の測定が可能な広帯域検出法を提案する。

EMAT を等価回路で表すと、Fig. 5.2.1-1になる。我々の EMAT のインピーダンスを配管に設置した状態で測定すると、 $R=120\Omega$ 、 $L=136\mu\text{H}$ 、 $C=0\mu\text{F}$ であった。なお、単体では $R=97\Omega$ 、 $L=129\mu\text{H}$ 、 $C=0\mu\text{F}$ であった。EMAT はコイルそのものであることから、インピーダンスに含まれるインダクタンス成分が大きい。インダクタンス成分が大きいことから、励磁電流波形に歪みが生じる。パルスエコー法では、周波数を一定とすることができるため、電源側と EMAT コイルのインピーダンスを整合することで励磁波形の歪みを最小化し、検出信号を最大化することができる。共振法では、励磁周波数を掃引するため、インピーダンスは Fig. 5.2.1-2 に示すように、励磁周波数によって変化し、電源側のインピーダンスと整合することができない。この時の励磁電流を、回路シミュレータを用いてシミュレーションした結果を、Fig. 5.2.1-3 に示す。実際の励磁電流の測定は、MHz オーダーの高周波であること、値があまり大きくないことから、比較的高価な電流プローブが必要である。一方で、試験体表面に発生する超音波は励磁電流に比例するため、励磁電流波形の歪みは超音波の歪みに繋がる。超音波が歪むということは、特定の周波数で励磁しても、送信された超音波はある程度の周波数帯を持つことを意味している。これを利用し、1回の測定波形からある程度の帯域の共振の程度を得ることができれば、励磁周波数の掃引間隔を広げて、厚さ測定時間を短くすることが期待できる。これを実現するには、励磁波形の周波数帯域を知る方法と、検出波形から任意の周波数成分を抽出する方法が求められる。

EMAT のインピーダンスは配管への設置状態によって変化するため、励磁波形の周波数帯域は EMAT を配管に設置しなければわからない。また電流プローブのような測定器を必要とする。共振状態を判定する式として式(2.3-1)を挙げたが、この式は受信波形に含まれ

るすべての周波数成分の共振エネルギー量を評価しているのので、検出信号から任意の周波数成分を得るには不適當である。また FFT では、EMAT で得られる共振信号が Fig. 2.3-1 に示したように数百 μs であることから、1kHz 以下の周波数分解能を得ることができない。

そこで、EMAT を配管に設置した状態で、新たな測定器を必要とせずに励磁波形の周波数帯域を測定する方法のプロ案と、同期検波(Fig. 5.2.1-4 参照)を用いて検出信号から任意の励磁周波数成分を取り出すことを試みた。最初に同期検波について説明する。

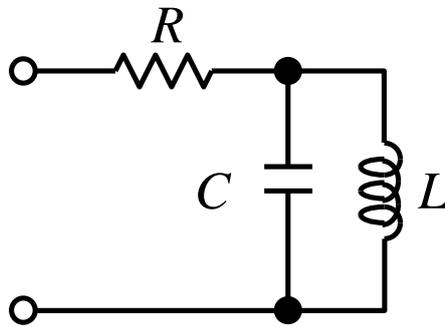


Fig. 5.2.1-1: Equivalent circuit of EMAT.

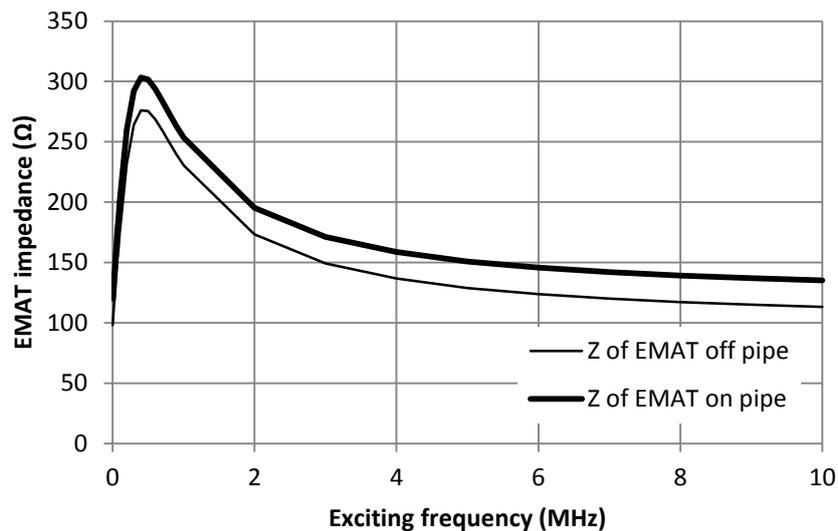


Fig. 5.2.1-2: Frequency response of EMAT impedance

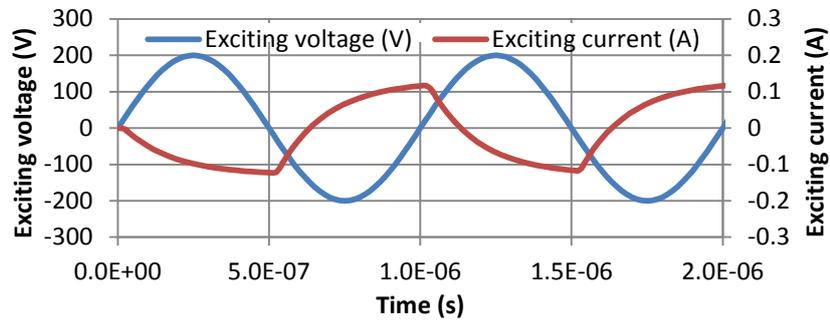


Fig. 5.2.1-3: Simulation results of exciting voltage and current waveform

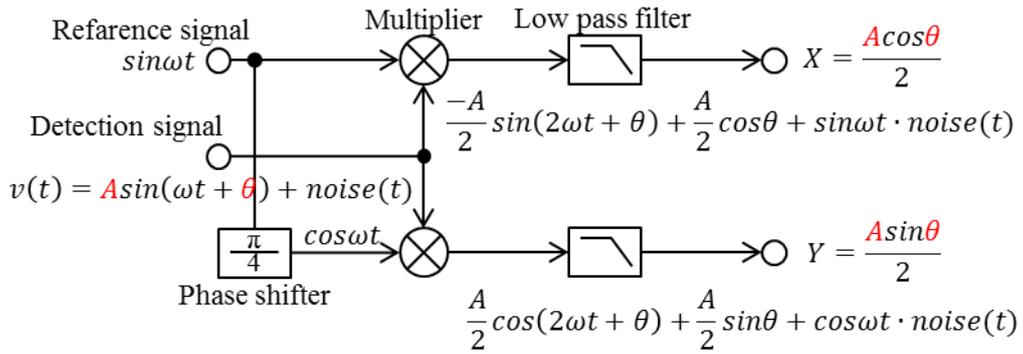


Fig. 5.2.1-4: Synchronous detection

測定波形 $v(t)$ は次式で与えられるとする。このとき ω を励磁かつ厚さに対してユニークな共振角周波数とする。

$$v(t) = A \sin(\omega t + \theta) + \text{Noise}(t) \quad (5.2.1-1)$$

ここで測定信号として有意義な値は A , θ であり、これらを取り出す。式(5.2.1-1)に周波数の等しい $\sin(\omega t)$ と $\cos(\omega t)$ を掛けると次式が得られる。

$$\begin{aligned} x(t) &= v(t) \sin \omega t \\ &= \sin \omega t \{A \sin(\omega t + \theta) + \text{Noise}(t)\} \\ &= \frac{-A}{2} \{\cos(\omega t + \omega t + \theta) - \cos(\omega t - \omega t - \theta)\} + \sin \omega t \cdot \text{Noise}(t) \\ &= \frac{-A}{2} \cos(2\omega t + \theta) + \frac{A}{2} \cos \theta + \sin \omega t \cdot \text{Noise}(t) \end{aligned} \quad (5.2.1-2)$$

$$\begin{aligned} y(t) &= v(t) \cos \omega t \\ &= \cos \omega t \{a \sin(\omega t + \theta) + \text{Noise}(t)\} \\ &= \frac{-A}{2} \{\sin(\omega t + \omega t + \theta) - \sin(\omega t - \omega t - \theta)\} + \cos \omega t \cdot \text{Noise}(t) \\ &= \frac{A}{2} \sin(2\omega t + \theta) + \frac{A}{2} \sin \theta + \cos \omega t \cdot \text{Noise}(t) \end{aligned} \quad (5.2.1-3)$$

式(5.2.1-2), (5.2.1-3)の第 1,3 項は時間 t の関数である。 ω や $\text{Noise}(t)$ の周波数成分より十分低い周波数をカットオフ周波数とするローパスフィルタを通すことで、第 1,3 項は 0 に近づく。一方で第 2 項は定数つまり直流であり、ローパスフィルタを通すことで減衰しない。よってローパスフィルタを通した式(5.2.1-2), (5.2.1-3)を X, Y とすると、次式で表現できる。

$$X = \frac{A}{2} \cos \theta \quad (5.2.1-4)$$

$$Y = \frac{A}{2} \sin \theta \quad (5.2.1-5)$$

式(5.2.1-4), (5.2.1-5)から, 以下のように A, θ を次式の通り求めることができる。

$$A = 2\sqrt{X^2 + Y^2} \quad (5.2.1-6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Y}{X} \quad (5.2.1-7)$$

以上のように, 同期検波を用いることで, A, θ を求めることができる。共振周波数成分の振幅 A が十分に大きいとき, 共振状態であるといえる。本実験では共振している超音波のエネルギーを評価しているので, 励磁周波数 f に対する A に着目する。前述したように, 共振状態は数百 μs で減衰するため, A は時間によって減衰する。そこで f における(5.2.1-6), 式(5.2.1-7)を $X(f), Y(f)$ とし, その共振エネルギー $R(f)$ を次式で評価することとする。

$$R(f) = 2\sqrt{X(f)^2 + Y(f)^2} \quad (5.2.1-8)$$

これにより, ナイキスト定理の許す限り, 励磁周波数によらず, 受信波形に含まれる任意の共振周波数成分を取り出すことができる。必要に応じて 0.1kHz 単位の周波数成分を取り出すことが可能であるが, ここでは検波周波数は 1kHz 刻みとした。

次に本実験に用いた測定系がどの程度の周波数帯を持つのかを確認する。超音波は励磁電流に比例するため, 励磁電流の周波数成分を測定することで測定系の持つ周波数帯を知ることができる。電流を測るにはシャント抵抗や電流プローブを用いればよい。しかし励磁波形は高周波かつ高電圧であり, さらに受信する信号は微小電流であることから, これらの手段で共振信号を得ながら励磁電流を測定することは容易ではない。そこで, 測定が容易, かつ, 電流プローブのように新たな測定器を必要としない方法で, 測定系の周波数帯を測定する方法を提案する。

まず, 共振周波数 f_R が既知の試験体(もしくは配管の健全部)を用いて, f_R の前後の十分な範囲で測定を行う。通常は同期検波の検波周波数と励磁周波数 f は同じ周波数を用いるが, f が異なるすべての測定結果に対して f_R を用いて同期検波を行う。SS400 材, 厚さ

5.00mm において測定した、励磁周波数 f 、検波周波数 $f_R=1294\text{kHz}$ である $R_{1294\text{kHz}}(f)$ を Fig. 5.2.1-3 に示す。縦軸は最大値で正規化した。この特性曲線からは、励磁周波数が f_R と一致した時、最大値を取り、その前後 25kHz の励磁周波数で約 1/10 になっていることが分かる。これは $f=f_R\pm 25\text{kHz}$ のとき、受信波形には f_R が 10%含まれていることを意味する。 f_R は共振周波数であるから他の周波数成分と比較して減衰は極めて小さい。よって $f=f_R\pm 25\text{kHz}$ の送信波形にも f_R が同程度、つまり 10%程度含まれていると言える。この周波数特性は、その EMAT が有効な周波数帯において同様な傾向を示した。つまり、信号強度が 1/10 になることに問題がなければ、励磁周波数の $\pm 25\text{kHz}$ の範囲の共振エネルギー $R(f)$ を、1 回の測定で得ることができることを意味する。掃引間隔を 50kHz として測定した共振スペクトルを Fig. 5.2.1-4 に示す。これから Fig. 2.3-2 と同じ Δf を得ることができた。従来の 1kHz 間隔で 1000 回の測定が、その 1/50 の回数で行うことができたことになる。この手法を”単一周波数励磁による広帯域検出法”(以下、単一周波数励磁)とする。

本手法の結果(Fig. 5.2.1-4)は、Fig. 2.3-2 のスペクトルと、Fig. 5.2.1-3 のスペクトルを励磁周波数間隔(今回は 50kHz)繰り返したスペクトルを掛け合わせた結果になる。したがって、Fig. 5.2.1-3 を用いて補正することでより正確な厚さを評価することができるが、本論文では補正をせずに評価を試みた。

このように、単一周波数で励磁しても、実際には広い周波数帯を持っているということは、エネルギー効率が悪いともいえるが、Fig. 2.3-2, 5.2.1-4 に示すように十分な SN 比を持っていることから、実機環境においては、Fig. 5.2.1-3 に示す周波数特性を考慮して掃引間隔を調整することで、短時間での測定が可能である。また、励磁電流波形の歪みは測定系の電磁気的な結合の度合いで決まる。EMAT を変えれば当然であるが、同じ EMAT であってもケーブル長が異なったり、試験体が異なったりすることで測定系のインピーダンスが変わる。つまり試験体に EMAT を設置しないとインピーダンスが分からない。本手法のように、測定器を必要とせず試験体に EMAT を設置した状態で Fig. 5.2.1-3 に示す周波数特性を測定できる方法は、広帯域検出法を実機に適用するために有効な手法である。

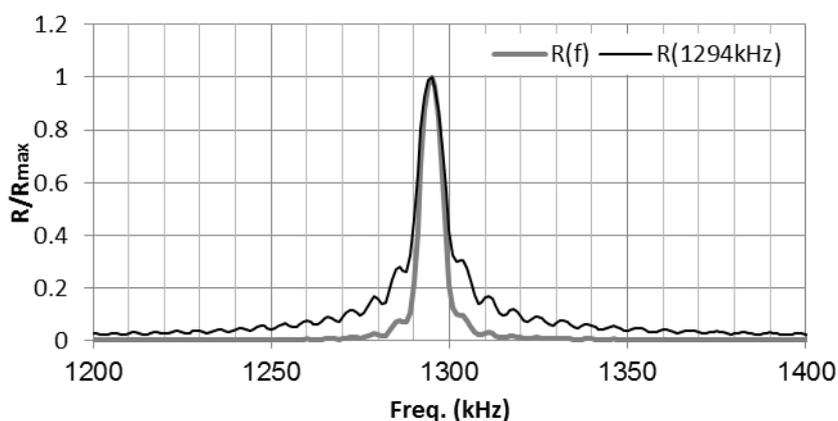


Fig. 5.2.1-3: Receive waveform spectrum using single and wide frequency detection method. $R(f)$ is a receive waveform spectrum with single frequency detection method. $R(1294\text{kHz})$ is a receive waveform spectrum with wide frequency detection method using 1294kHz. An exciting waveform using 1294kHz has 10% signals with 1269kHz of signals with 1294kHz.

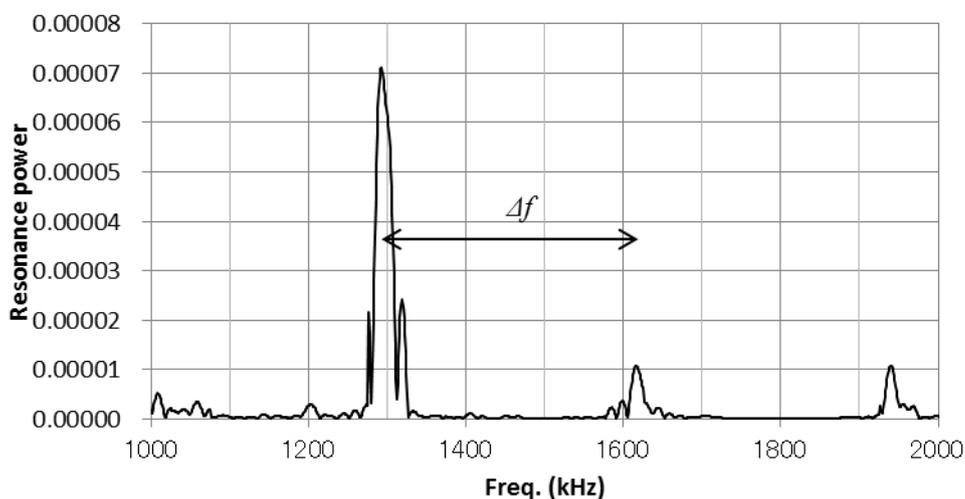


Fig. 5.2.1-4: Receive waveform spectrum using wide frequency detection method.

5.2.2. 広帯域励磁による共振法

次に、この特徴をより積極的に利用し、パルスエコー法のように1回の測定で $4f$ を求められることができる手法を提案する。まず1000kHzから2000kHzの正弦波を重ねたインパルス波形 e は以下のように表せる。

$$e(t) = \sum_{f=1000\text{kHz}}^{2000\text{kHz}} (A \sin(2\pi ft)) \quad (5.2.2-1)$$

Fig. 5.2.2-1は、 t を0~20 μs 、 e の最大値を約750Vとしたときの波形である。この励磁波形をEMATに印加する。次に得られた受信結果に対して、1kHzごとに同期検波を用いる。この結果と励磁電圧波形の周波数成分をFig. 5.2.2-2に示す。励磁波形の持つ周波数帯域内で複数の共振周波数が確認できる。励磁にインパルス波形を用いることで、必要とする範囲の共振周波数を1回の測定で得ることができる。この手法を”多重周波数励磁による広帯域検出法”(以下、多重周波数励磁)とする。インパルス波形を用いて信号解析する手法は一般的な手法であるが、UTの場合、十分な信号強度を維持して適用できる周波数帯域が狭く、 $4f$ が大きくなる板厚が薄い場合は適用が困難である。同様な効果を狙った手法として、チャープ波を用いた手法がある。これにより、広帯域検出法を用いない場合は、1000kHzから2000kHzを測定するのに数十分かかっていたのが、単一周波数励磁を用いることで1分程に、多重周波数励磁を用いることで1秒かからずに共振スペクトルを得ることができる。よって広帯域検出法を用いることで、分解能と測定時間の両立を図ることができる。広帯域検出法は、任意の周波数検出が可能な同期検波技術と、使用可能な周波数帯域が数MHzと広いEMATを用いることで適用可能な手法である。

一方で、1回の測定でEMATに与えることのできるエネルギーは有限であるので、励磁周波数間隔を広げるほど、1周波数当たりのエネルギーは減少する。多重周波数励磁(周波数帯域1000kHz)と単一周波数励磁(同50kHz)の測定結果を比較すると、ピークの振幅が1/200になっているのが確認できる(Fig. 5.2.2-3)。管や管内部の減肉量を測定する場合、超音波の裏面での反射率が小さくなることが予想される。よって励磁方法は試験体の状況によって使い分ける必要がある。

以後の測定では指定しない限り多重周波数励磁を用い、SN比が悪化して検出が困難な個所では単一周波数励磁を用いる。

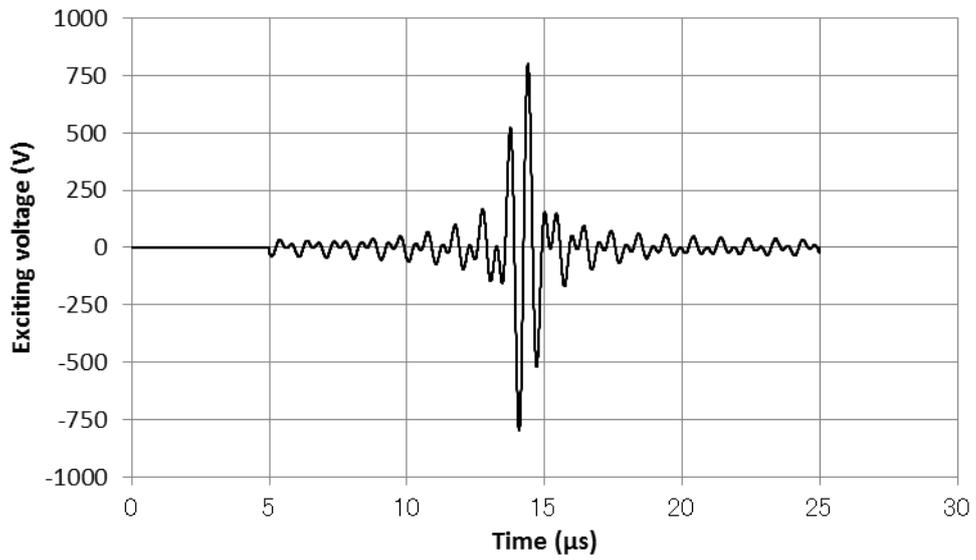


Fig. 5.2.2-1: Exciting waveform

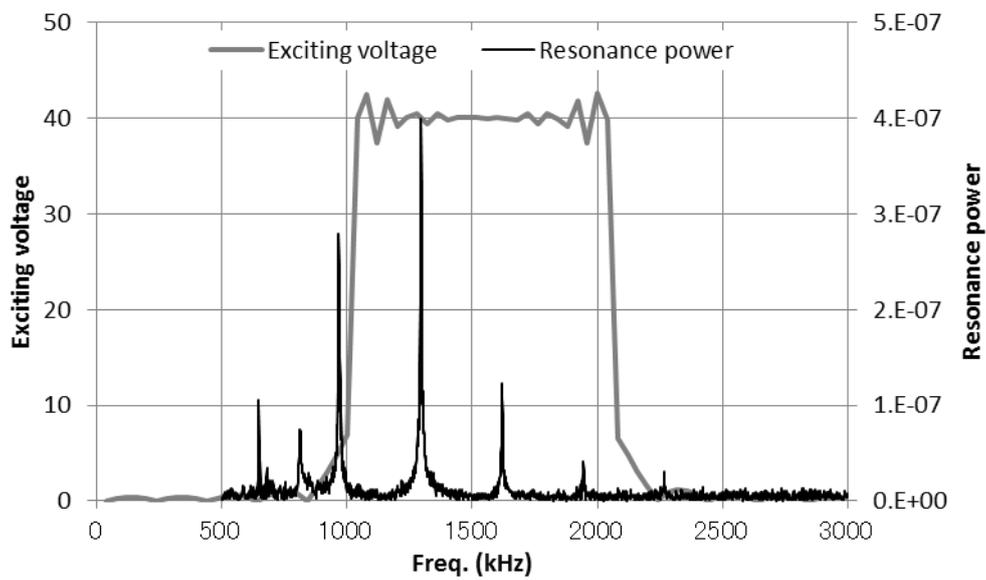


Fig. 5.2.2-2: Frequency spectrum of exciting and resonance waveform

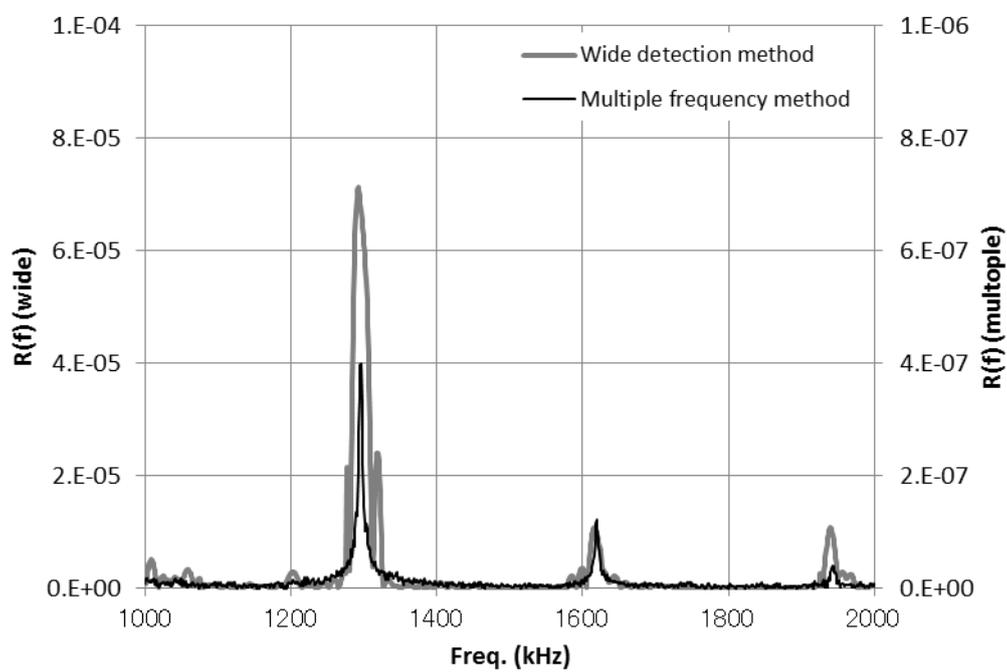


Fig. 5.2.2-3: Resonance spectrum by wide frequency method

5.3. 実機 FAC への適用

5.3.1. 試験体

実機減肉を想定して2つの試験体を準備した。一つは、実機環境を模擬し、配管内に気体と液体の二相流を発生させ、配管内部に FAC を発生させる試験装置を用いて作成した試験体である。母材は4章で用いたものと同じである。減肉を発生させるのに用いた装置を Fig. 5.3.1-1 に示す。減肉試験の条件は、温度 165°C，流速 4m/s，溶存酸素濃度 1ppb 以下(平均 0.3ppb)，中性(25°C のとき平均 pH 6.2)の单相流であり，約 1500 時間の試験を行っている。本試験体は，東京電力(株)により制作されたものである^[73]。もう一つは，供用が終了した実機火力発電プラントのオリフィス下流部である。母材は SS 材，呼び径 6B の配管である。運転時間は 200,317 時間である。本供用配管は関西電力(株)堺港火力発電所旧 5 号機タービン建屋内にある。二つの試験体は，UT によりオリフィス下流に減肉が確認されている。

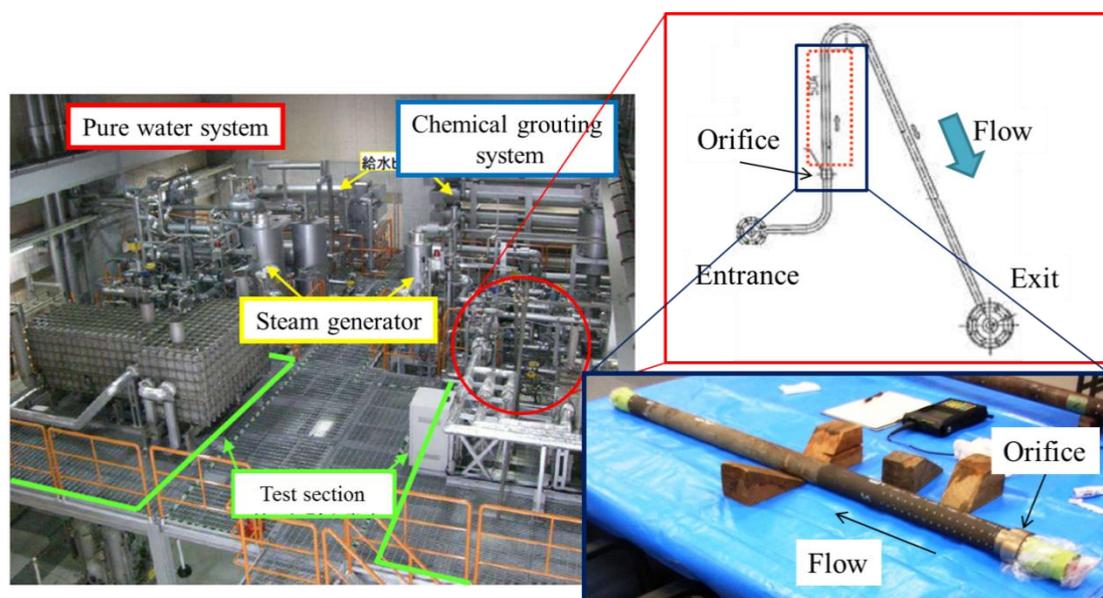


Fig. 5.3.1-1: FAC specimen at laboratory facility. The authors also gratefully acknowledge Tokyo Electric Power Co. Inc. for their assistance in the experimental works.

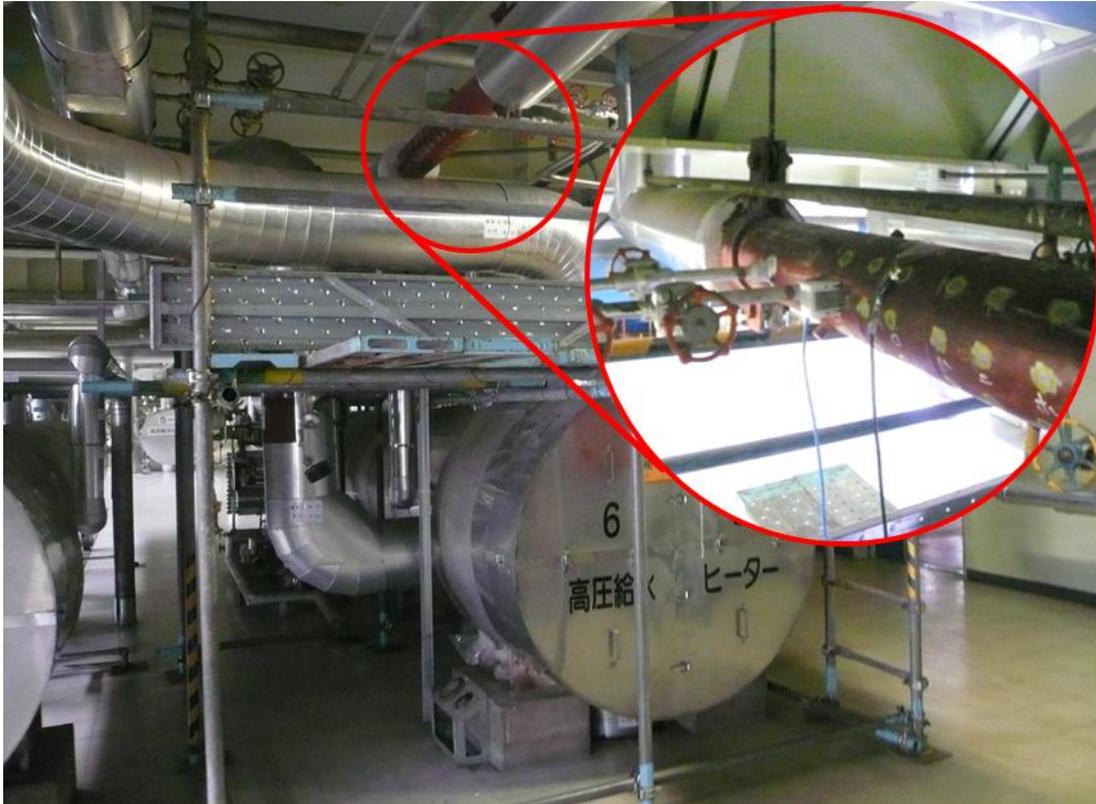


Fig. 5.3.1-2: Orifice downstream in the real plant. The feasibility studies of pipe wall thickness measurements by EMAR method were carried out in the real plant of Fossil Power Engineering Center, Kansai Electric Power Co. Inc. Since measurement points are located at a height, scaffolds in the photograph are prepared.

5.3.2. 測定方法

試験体の測定位置を Fig. 5.3.2-1,2 に示す。日本機械学会の減肉管理規格^[14]では、呼び径 5B 以下の小口径管の周方向測定点は 4 点としているが、本研究では、より多くのデータを得るため、2B 配管も周方向に 8 点測定した。同様の理由で軸方向にも規格では測定点はオリフィスから内径の 1,2,3 倍 3 か所とあるが、2B 配管においては、20mm 間隔で測定した。ただし、10 と 20 の間隔は、オリフィス際の測定を行うため 10mm とした。6B 配管の測定点は規格通りである。なお、2B 配管については管を開いて内面の状態を観察した。

EMAT は Fig. 5.3.2-3 の EMAT を用いた。Fig. 5.3.2-3(a) の EMAT は Fig. 3.2.2-1 の EMAT と同じである。Fig. 5.3.2-3 の EMAT は複雑な減肉形状への対応を想定して、有効面積を小さくした。これは UT において探触子形状が測定の可否に影響を与えるという知見^[11]を踏まえ、事前に用意したものである。

測定は、試験体を制作した企業の研究所、または発電所内において、各 2 日間で行った。測定にかけた時間は、2B 配管は約 8 時間、6B 配管は約 4 時間である。これには装置(バースト電源、フィルタ、オシロスコープ、パソコン等)の設置、測定条件(励磁電圧、励磁周波数間隔)の選定、EMAT の移動を含む。これは UT を用いた測定と比較すると長い。装置の設置、測定条件の選定は、今後の改良で簡単になることが期待できる。これらを除いた時間、つまりセンサを設置して結果が出てくるまでの時間は、広帯域励磁を用いると UT と同程度、信号強度が十分ではない箇所において単一周波数励磁を用いた場合は 1 か所当たり 1 分であった。発電所内における測定環境を Fig. 5.3.2-4 に示す。

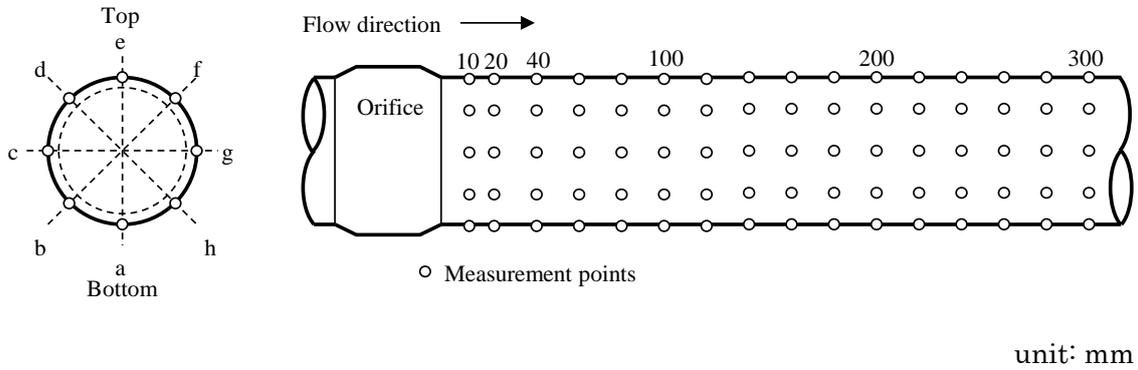


Fig. 5.3.2-1: Measurement grids at orifice downstream (2B) in the laboratory facility

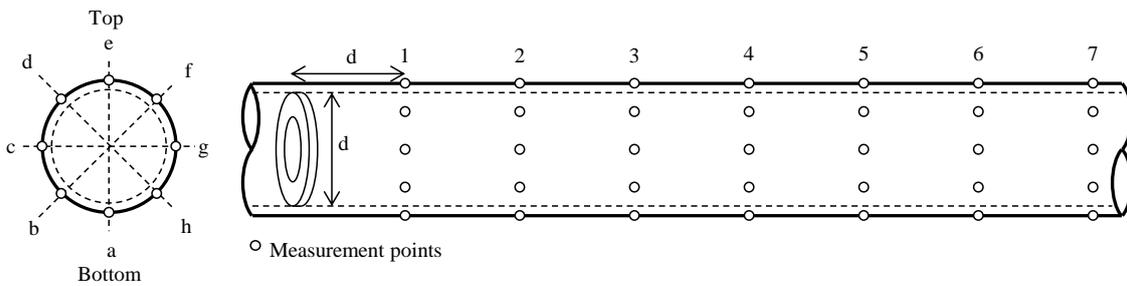


Fig. 5.3.2-2: Measurement grids at orifice downstream (6B) in the real plant

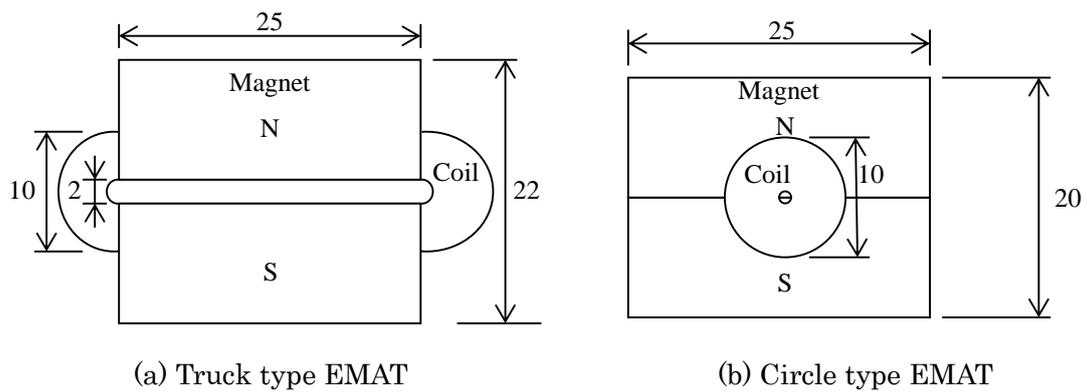


Fig. 5.3.2-3: Schematics of the sensor structure of EMATs.



Fig. 5.3.2-4: Measurement field in thermal power plant

5.3.3. 測定結果

2B 配管の測定結果を Table 5.3.3-1,2 及び Fig. 5.3.3-1,2 に示す。健全部の配管厚さは 5.5mm である。まず EMAT の測定結果を見ると、オリフィス下流は全体的に減肉しており、200mm 程度まで減肉が進んでいた。特に軸方向 40mm~100mm において顕著な減肉がみられる。この減肉傾向はオリフィス下流の配管内径の 4 倍程度まで減肉しやすいという FAC の一般的な傾向とよく一致している。周方向においては g, h で減肉が進んでいるのが確認できる。これはオリフィスの溶接線によって流体の乱れが生じていることによると考えている。なお、g80 付近では Type A の EMAT では共振周波数を得ることができず、Type B の EMAT で厚さ測定を行った。この時得られた周波数スペクトルを Fig. 5.3.3-2 に示す。Type A,B を g40 の周波数スペクトルと比較すると、コイル面積、巻き数が大きい Type A の EMAT の方が、振幅が大きい。一方で、Type B の EMAT においても十分な SN 比で Type A と同じ共振周波数を確認できる。g80 の周波数スペクトルと比較すると、Type A の EMAT では共振周波数が確認できない一方で、Type B の EMAT では明確に共振周波数を確認できる。測定後に試験体を開封し配管内表面を観察した。配管内表面の写真を Fig. 5.3.3-3 に示す。200mm 付近までは明確に腐食している様子が伺えるが、それ以降はほとんど減肉が生じていない。また、測定が困難であった g80 付近において Fig. 5.3.3-3(b) に示す FAC 特有の鱗片模様が確認された。4.3.3 で述べた、減肉部の厚さ測定においては探触子の構造が測定の可否に影響を与えることについて、実際の FAC を用いた実験から確認できた。UT による厚さ測定結果とは、最大 0.4mm の誤差があった。UT の測定において探触子の微妙な位置が測定結果に影響を与えているのを確認した。その中で最も小さい厚さ測定結果を採用している。内面観察から確認した通り、減肉面には凹凸が発生していたため、探触子の微妙な位置により測定結果が振れてしまったものと考えられる。しかし EMAT と UT の測定結果は傾向として一致している。したがって、探触子を固定することでこのようなバラつきはなくなると考える。

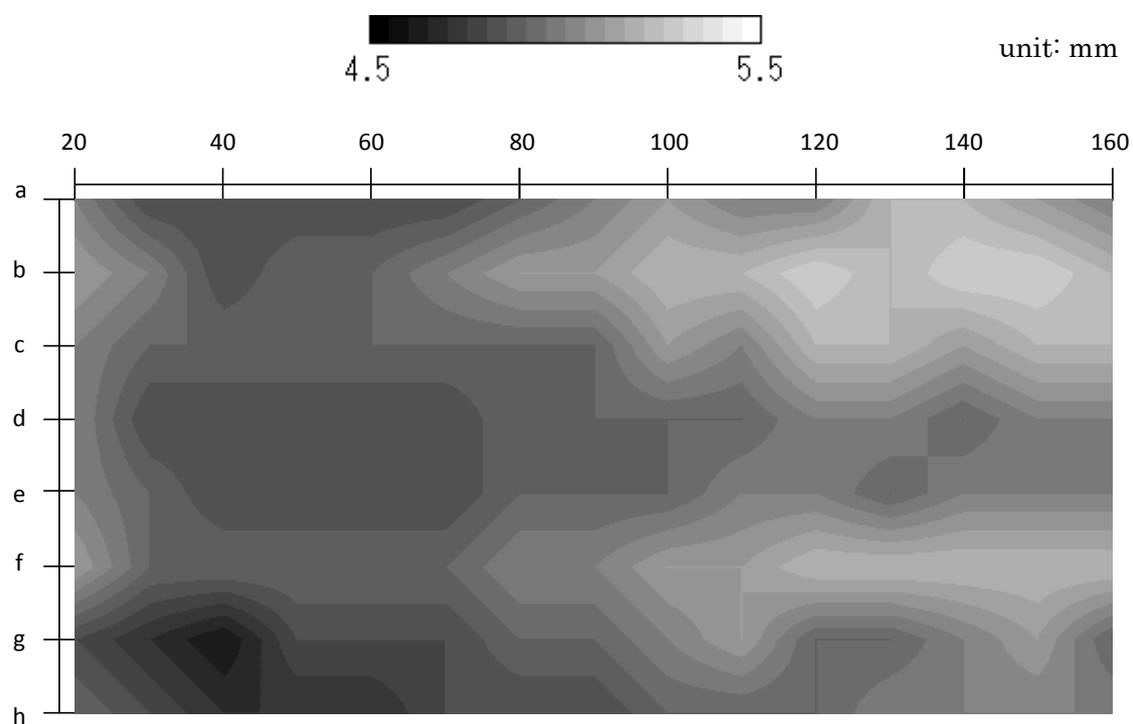
なお、EMAT、超音波厚さ計での最大減肉量は両方とも 0.55mm であった。減肉率に換算すると 3.2mm/year となる。かなり早い減肉率であるが、実機環境と比較して減肉の進展が加速される条件で配管減肉試験を行ったことによる。これは減肉の要因を把握できている証左とも言える。

Table 5.3.3-1: Estimating sizing results of 2B test sample by EMAT

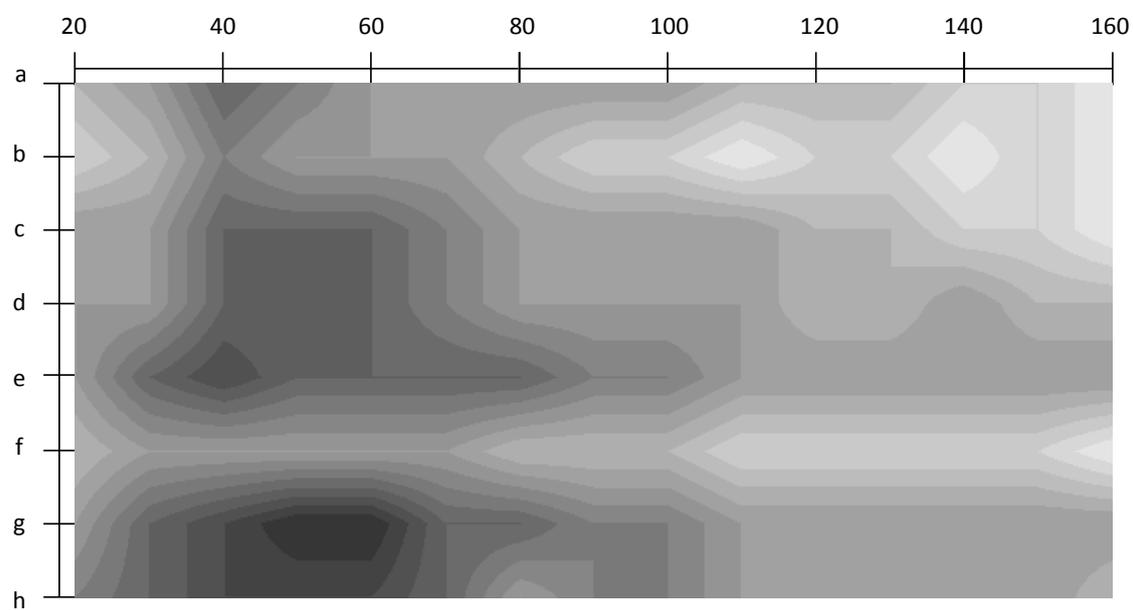
| | | Circumference direction position | | | | | | | |
|------------------------------|-----|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | a | b | c | d | e | f | g | h |
| Axis direction position (mm) | 20 | 5.0 | 5.1 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.1 | 4.8 | 4.9 |
| | 30 | 4.8 | 5.0 | 4.9 | 4.8 | 4.9 | 4.9 | 4.7 | 4.8 |
| | 40 | 4.8 | 4.8 | 4.9 | 4.8 | 4.8 | 4.9 | 4.6 | 4.7 |
| | 50 | 4.8 | 4.9 | 4.9 | 4.8 | 4.8 | 4.9 | 4.8 | 4.7 |
| | 60 | 4.8 | 4.9 | 4.9 | 4.8 | 4.8 | 4.9 | 4.8 | 4.7 |
| | 70 | 4.8 | 5.0 | 4.9 | 4.8 | 4.8 | 4.9 | 4.8 | 4.8 |
| | 80 | 4.9 | 5.1 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 5.0 | 4.9 | 4.8 |
| | 90 | 5.0 | 5.1 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 5.0 | 4.9 | 4.8 |
| | 100 | 5.1 | 5.2 | 5.1 | 4.9 | 4.9 | 5.1 | 5.0 | 4.9 |
| | 110 | 5.0 | 5.2 | 5.0 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.1 | 4.9 |
| | 120 | 5.0 | 5.3 | 5.2 | 5.0 | 5.0 | 5.2 | 4.9 | 4.9 |
| | 130 | 5.2 | 5.2 | 5.2 | 5.0 | 4.9 | 5.2 | 4.9 | 5.0 |
| | 140 | 5.2 | 5.3 | 5.1 | 4.9 | 5.0 | 5.2 | 5.0 | 5.0 |
| | 150 | 5.1 | 5.3 | 5.2 | 5.0 | 5.0 | 5.2 | 5.1 | 5.0 |
| 160 | 5.0 | 5.2 | 5.2 | 5.0 | 5.0 | 5.2 | 4.9 | 5.0 | |

Table 5.3.3-2: Estimating sizing results of 2B test sample by UT

| | | Circumference direction position | | | | | | | |
|------------------------------|-----|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | a | b | c | d | e | f | g | h |
| Axis direction position (mm) | 20 | 5.2 | 5.3 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.2 | 5.1 | 5.0 |
| | 30 | 5.1 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 4.9 | 5.1 | 4.9 | 4.9 |
| | 40 | 4.9 | 5.0 | 4.9 | 4.9 | 4.8 | 5.1 | 4.8 | 4.8 |
| | 50 | 5.0 | 5.1 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 5.1 | 4.7 | 4.8 |
| | 60 | 5.1 | 5.1 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 5.1 | 4.7 | 4.8 |
| | 70 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 5.0 | 4.9 | 5.1 | 4.9 | 4.9 |
| | 80 | 5.1 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 4.9 | 5.2 | 4.9 | 5.1 |
| | 90 | 5.1 | 5.3 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 5.2 | 5.0 | 5.0 |
| | 100 | 5.1 | 5.3 | 5.1 | 5.1 | 5.0 | 5.2 | 5.0 | 5.0 |
| | 110 | 5.2 | 5.4 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.3 | 5.1 | 5.1 |
| | 120 | 5.2 | 5.3 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.3 | 5.1 | 5.1 |
| | 130 | 5.2 | 5.3 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.3 | 5.1 | 5.1 |
| | 140 | 5.3 | 5.4 | 5.3 | 5.1 | 5.1 | 5.3 | 5.1 | 5.1 |
| | 150 | 5.3 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.1 | 5.3 | 5.1 | 5.1 |
| 160 | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 5.2 | 5.1 | 5.4 | 5.1 | 5.2 | |

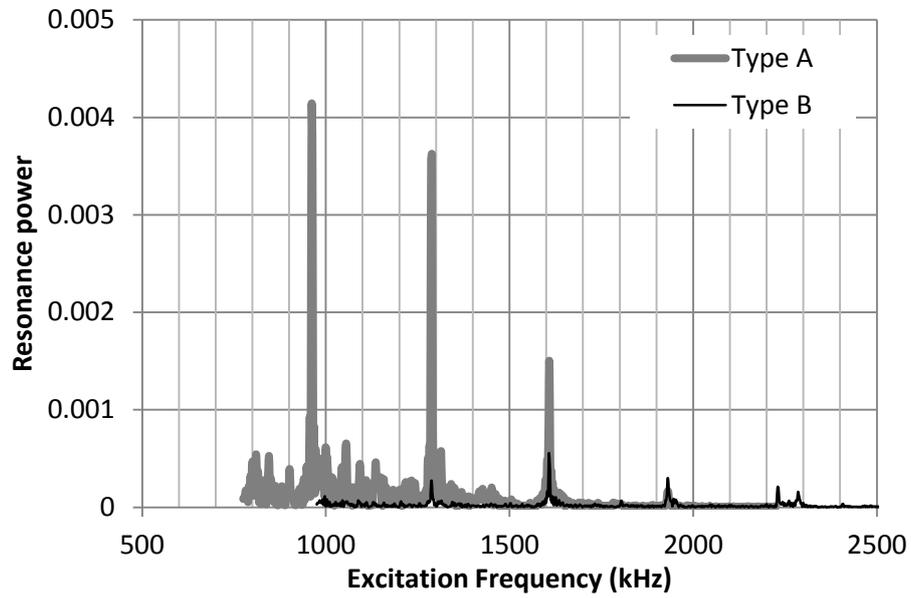


(a) EMAT

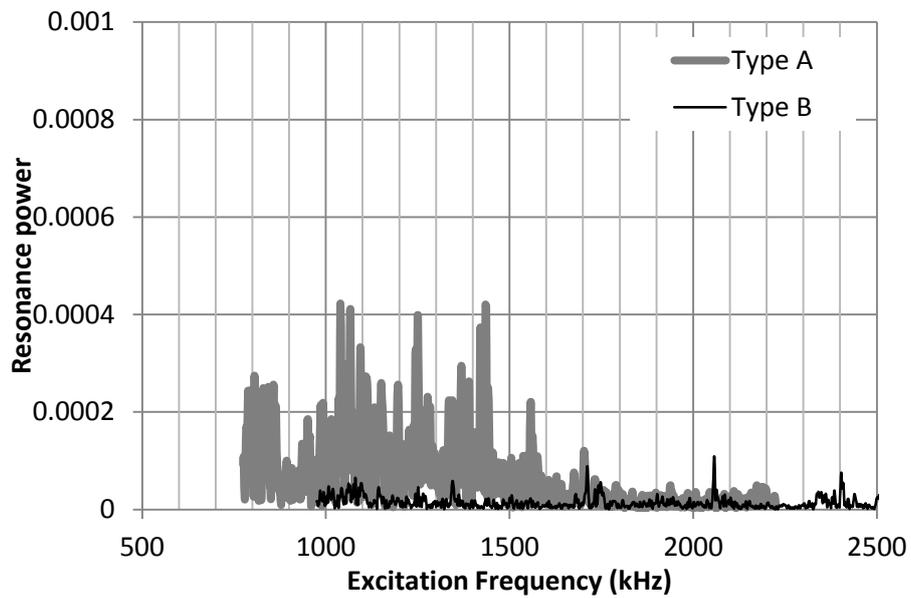


(b) UT

Fig. 5.3.3-1: Estimating sizing results of 2B pipe with natural FAC.

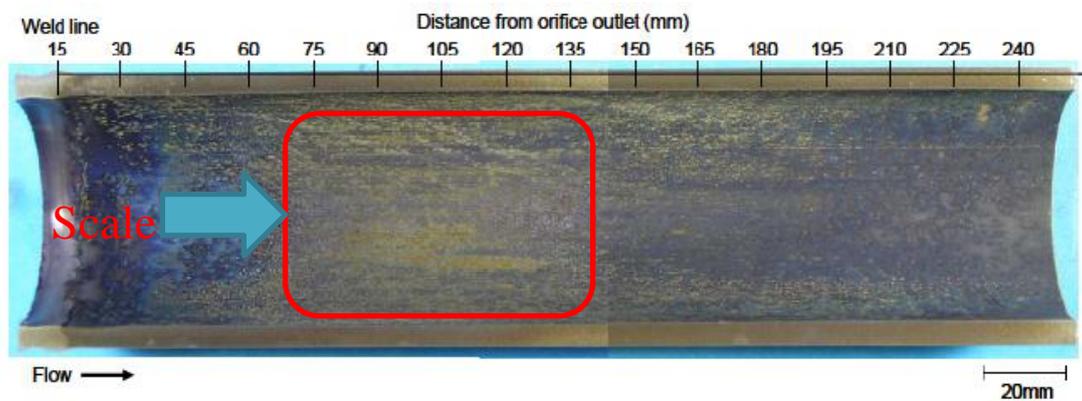


(a) At g40

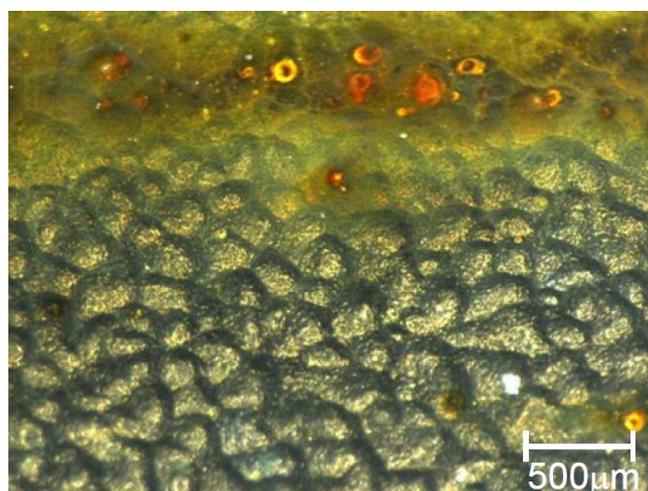


(b) At g80

Fig. 5.3.3-2: Resonance spectrum at surface of natural FAC



(a) Cut test pipe



(b) Surface of natural FAC with scale

Fig. 5.3.3-3: Inner surface photograph of 6B pipe with natural FAC^[73].

6B 配管の測定結果を Table 5.3.3-3, 4 及び Fig. 5.3.3-4 に示す。健全部の配管厚さは 11.0mm である。日本機械学会の技術規格では 6B 配管は周方向に 8 点以上、流れ方向には配管内径の 4 倍まで測定することが求められている^[4]。EMAT の測定結果を見ると、オリフィス下流は全体的に減肉しており、オリフィスから内径の 1 倍の位置(1D)から 4D まで 1.3mm~2.5mm 程度減肉していることが確認できる。4D 以降はほとんど減肉していない。これは FAC の一般的な傾向と一致している。周方向については若干のムラはある。オリフィスの溶接線の影響が考えられる。

最大減肉は EMAT, UT ともに 2.5mm であり、よって減肉率は 0.11mm/year であった。最小必要厚さは 3.8mm であるので、この配管は後 42 年の余寿命があることになる。運転条件が変われば減肉のスピードも変わるので、このことだけで配管の次回の厚さ検査を 10 年後とすることは危険であるが、発電プラントが十分な余裕をもって設計されていることがわかる。

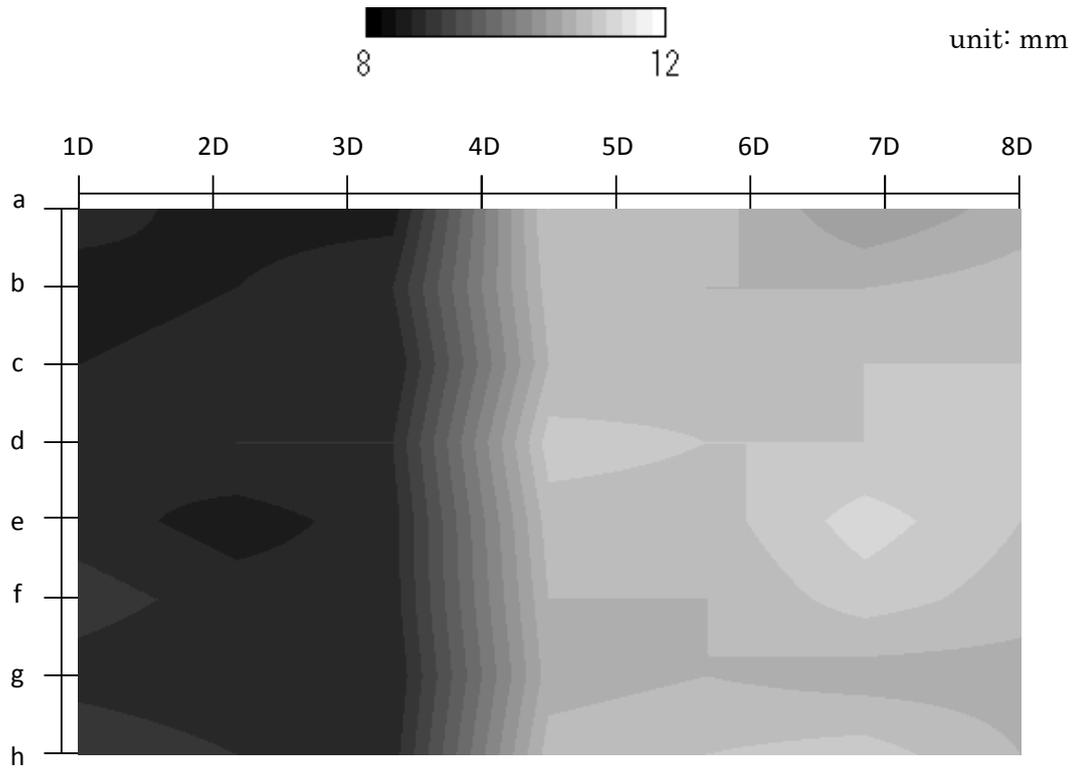
このように、EMAT を用いて 2 つの FAC 試験体の配管厚さを測定したが、UT と同等の減肉率を算出することができた。

Table 5.3.3-3: Estimating sizing results of 6B test sample by EMAT

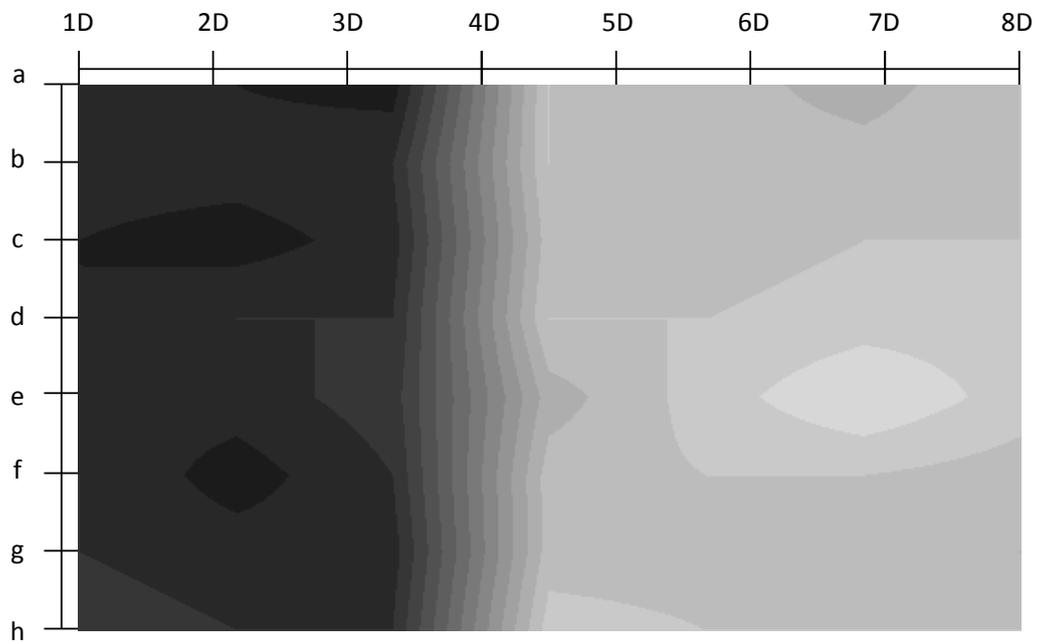
| | | Circumference direction position | | | | | | | |
|-------------------------|----|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | a | b | c | d | e | f | g | h |
| Axis direction position | 1D | 8.7 | 8.5 | 8.6 | 8.6 | 8.7 | 8.9 | 8.7 | 9.0 |
| | 2D | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.5 | 8.7 | 8.6 | 8.8 |
| | 3D | 8.5 | 8.8 | 8.6 | 8.8 | 8.7 | 8.7 | 8.6 | 8.7 |
| | 4D | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 11.1 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.9 |
| | 5D | 10.9 | 10.8 | 10.9 | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.8 | 11.0 |
| | 6D | 10.4 | 10.8 | 11.0 | 11.0 | 11.3 | 11.1 | 10.7 | 11.1 |
| | 7D | 10.7 | 10.9 | 11.0 | 11.0 | 11.0 | 10.9 | 10.7 | 10.8 |

Table 5.3.3-4: Estimating sizing results of 6B test sample by UT

| | | Circumference direction position | | | | | | | |
|-------------------------|----|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | a | b | c | d | e | f | g | h |
| Axis direction position | 1D | 8.8 | 8.7 | 8.6 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.8 | 8.9 |
| | 2D | 8.6 | 8.7 | 8.5 | 8.8 | 8.7 | 8.5 | 8.7 | 8.8 |
| | 3D | 8.5 | 8.8 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 8.8 | 8.7 | 8.8 |
| | 4D | 11.0 | 11.0 | 10.9 | 11.0 | 10.7 | 10.9 | 10.9 | 11.1 |
| | 5D | 10.9 | 10.9 | 10.9 | 11.0 | 11.1 | 11.0 | 10.9 | 11.0 |
| | 6D | 10.7 | 10.9 | 11.0 | 11.1 | 11.4 | 11.0 | 10.9 | 11.0 |
| | 7D | 11.0 | 11.0 | 11.0 | 11.1 | 11.1 | 10.9 | 10.8 | 11.0 |



(a) EMAT



(b) UT

Fig. 5.3.3-4: Estimating sizing results of 6B pipe with natural FAC.

5.4. 実機適用における測定装置の提案

配管の減肉管理については、(社)日本機械学会の減肉管理技術規格が用いられており、配管の形状、径に応じた定点の厚さを測定することで、健全性を担保している。この技術規格に適合するためには、一か所あたり、断熱材下に最大 32 個のセンサを配置する必要がある。実機では、高所や狭所の配管の検査を行わなければならない。高所作業のための足場などを組む必要があり、また危険な場所においては遠隔計測が求められる。

EMAT を常設し、減肉監視法に適用する利点の一つは、常設することによる検査コストの効率化にある。EMAT を配管に常設することで、足場を組まなくてもよくなり、ケーブルを制御室まで敷設できれば、危険な場所へ作業員が入る必要がなくなる。本節では実機環境に求められる装置構成の提案を行う。

実機環境を考慮した実験装置の構成を Fig. 4.5-1 に示す。これは 1.2.2 で提案した EMAT の常時設置のための装置で、Fig. 1.2.2-1 を具体化したものである。1か所の EMAT の数は最大 32 コであるから、信号線は 32 本必要である。信号線を最小化するためのマルチプレクサを用いている。また微小信号を SN 比良く増幅するために、プリアンプをセンサ付近に配置し、パルサーなどのその他の計測器は制御室などの離れた場所に置くことを考慮している。試作したマルチプレクサを用いて測定を行った。マルチプレクサの有無にかかわらず、厚さを評価することが可能であった。今回製作したプリアンプ内蔵 32ch マルチプレクサは、8ch の有接点リレー基板を 4 枚搭載しその直後にプリアンプを配置している。外形は 300mm×200mm×200mm である。本研究は装置開発を主とするものではないので、装置の最適化は行っていないが、圧電素子用の超音波探傷装置では 64ch 等の小形のマルチプレクサが市販されており、その電氣的仕様から、わずかな変更で EMAT に使用できると思われる。試作したマルチプレクサは小口径管に配置するには大型ではあるが、圧電素子用の小形マルチプレクサを用いることで、小口径管側に一部の装置を配置することも可能である。

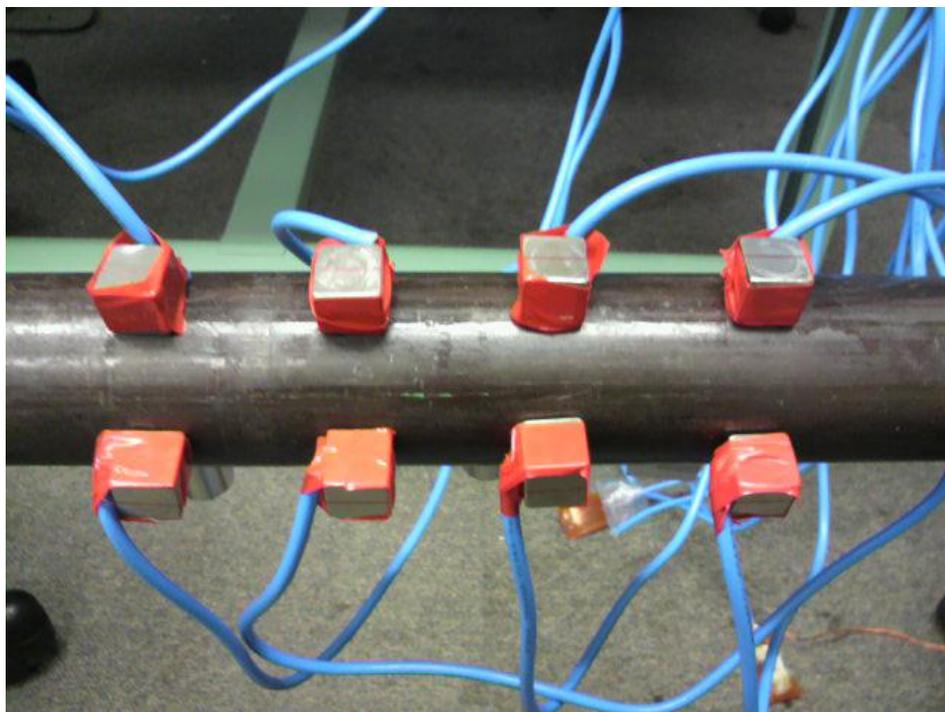
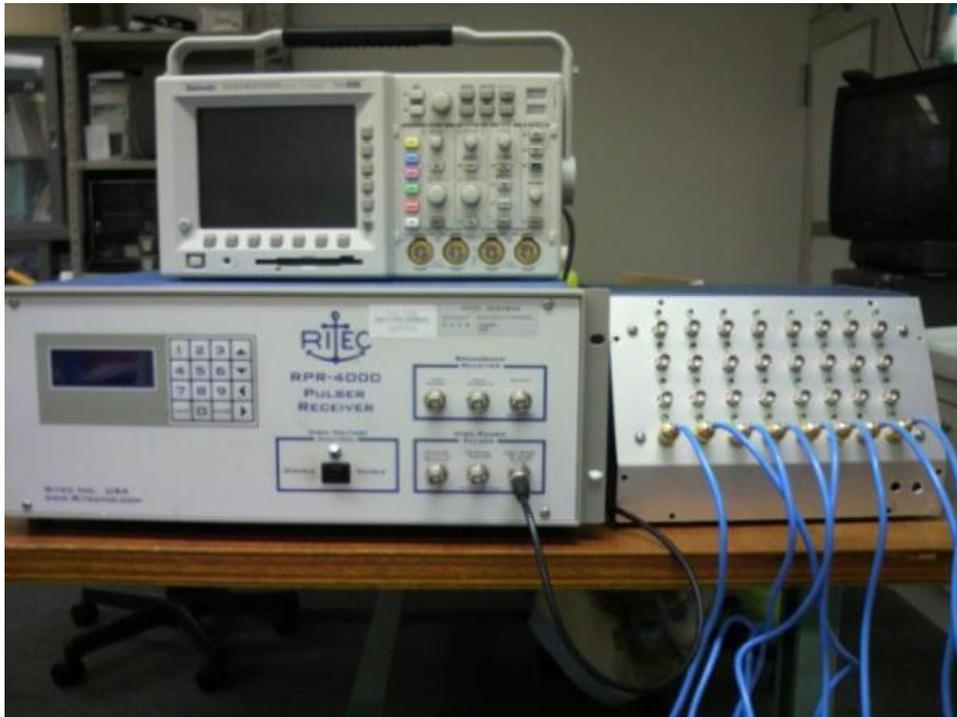


Fig. 4.5-1: Experimental setup using pipe side circuits

5.5. 結言

本章では、EMAT を用いた減肉評価のための測定方法の提案と、実機減肉配管への適用を試みた。精度のよい減肉診断のためには共振法の使用が望ましいが、1 点の共振法に数十分の時間がかかる。1 か所の測定において最小で 16 点の測定点があり、プラント全体の測定点は膨大であるため、検査時間の短縮が望まれる。そこで、我々は EMAT の電気的特性と同期検波技術を利用して短時間での厚さ測定手法を提案した。この手法は新たな測定器を用いることなく共振周波数を一瞬で得ることができ、厚さ測定分解能を低下させずに現実的な測定時間で配管の厚さ測定を行えることを確認した。

次に、FAC を生じた実機配管に本手法を用いて配管の厚さを測定した。EMAT を用いて配管に減肉を確認できた。その減肉は典型的な FAC の特徴を持っていることを確認できた。また、EMAT が UT と同程度の厚さ測定性能を持っていることを確認した。またコイル径を用いた UT の探触子形状と同程度に小さくすることで、測定が困難であった箇所での厚さ測定を可能とした。少ないサンプルではあるが、実機において EMAT による厚さ測定が可能であることを確認した。

また、試作したマルチプレクサを用いることで、複数の EMAT を順次駆動することができ、EMAT の常時設置による配管減肉の遠隔監視の可能性を確認した。

第6章 結論

発電プラントの配管減肉管理は科学的知見に基づいて適切に管理され、配管の健全性が担保されている。一方で、作業者の安全性の向上、減肉率を正確に把握するための改善が求められている。そこで我々は1章で「電磁超音波探触子を配管に常時設置することで配管減肉を状態監視する手法」を提案した。本手法は以下の利点を持っている。

- ・ 作業者が高所や放射線管理区画に入る必要がないため、作業者の安全が確保される。
- ・ 断熱材の内側に設置することから検査時に断熱材を除去する必要がない。
- ・ 電磁超音波の原理上の利点から、錆止め塗料を除去する必要がない。
- ・ 探触子を動かさないことから探触子の位置ズレが発生しない。
- ・ 時間基準ではなく、配管の状態を基準とした配管の管理が可能になる。

2章において PZT と比較しながら EMAT の特徴について述べ、その利点を裏付けた。一方で、本手法を適用するには、減肉測定において EMAT が UT と同等の性能を持っていること、他に問題がないことを確認する必要があった。そこで本論文ではこれらについて議論を行い、以下成果を得られた。

- ・ EMAT による減肉の FAC 状の減肉の寸法化は十分可能である(3章)。
- ・ EMAT は UT と同程度の性能を持っている(4章)。
- ・ EMAT による共振法の実用的な検査手法を提案した(5章)。
- ・ EMAT を実際の FAC の寸法化に適用し、UT と同等の評価結果を得られた(5章)。

これらについて各章ごとにまとめる。

3章において、EMAT を用いた配管減肉寸法化を試みた。まず、平板に減肉を模擬した欠陥を加工し、配管減肉の管理における EMAT の適用可能性について検討を行った。センサと減肉の相対位置を変化させた時の測定信号より、減肉幅を定量的に評価する手法を検討し、減肉形状寸法化法を提案した。本手法は比較的初期の FAC のような減肉の評価に有効であると考えている。また、FAC のような LDI より減肉面が緩やかに変化する減肉の場合、減肉の頂点だけでなく全周にわたって厚さを評価できることを配管試験体で確認した。

4章において、減肉形状のマクロ的な模擬を配管試験体によって、ミクロ的な模擬(減肉面の鱗片状の凹凸による応答)を平板試験体によって分けて行い、EMAT が FAC によるわ

第6章 結論

ずかな減肉の変化を捉えられることを実験から確認した。使用した EMAT の測定レンジが 20mm 以上あり、また厚さ分解能が 0.1mm 以下であることを確認した。これは従来の圧電素子型探触子を用いた手法と同等の性能である。

また FAC のマクロ的な形状を模擬した配管試験体を作成した。すべての測定点において十分な SN 比で Δf を測定することができ、0.1mm の僅かな変化を評価することができた。その測定結果は UT とほぼ同じであった。十分な SN 比で UT とほぼ同様の測定結果が得られた。さらに FAC のミクロ的な形状を模擬した鱗片試験体を作成した。鱗片の形状により、測定可否が分かれるが、より実際の鱗片に近い細かい鱗片模様であれば、実機適用の可能性は高いと考えられる。

以上のことから、EMAT は FAC の減肉率を評価可能な厚さ測定分解能を持っており、それは UT と同等であることを確認した。

5 章において、EMAT を用いた減肉評価のための測定方法の提案と、実機減肉配管への適用を試みた。精度のよい減肉診断のためには共振法の使用が望ましいが、共振法は 1 点の測定に数十分の時間がかかる。1 か所の測定において最小で 16 点の測定点があり、プラント全体の測定点は膨大であるため、検査時間の短縮が望まれる。そこで、我々は EMAT の電気的特性と同期検波技術を利用して短時間での厚さ測定手法を提案した。この手法は新たな測定器を用いることなく共振周波数を一瞬で得ることができ、厚さ測定分解能を低下させずに現実的な測定時間で配管の厚さ測定を行えることを確認した。

次に、FAC を生じた実機配管に本手法を用いて配管の厚さを測定した。EMAT を用いて配管に減肉を確認できた。その減肉は典型的な FAC の特徴を持っていることを確認できた。また、同じ個所を UT と同程度の厚さ測定性能を持っていることを確認した。またコイル径を用いた UT の探触子形状と同程度に小さくすることで、測定が困難であった箇所での厚さ測定を可能とした。

以上の成果により、「電磁超音波探触子を常時設置して配管の状態監視を行う手法」はプラントの健全性を確保するために有意義な手法であると言える。

本論文では触れなかったが、実機への適用のためには温度についての検討が必要である。例えば PWR 形の原子力発電プラントにおいては、場所によって 300°C を超える配管が存在する。さらに炉の出力や外気温の影響でその温度は変化する。配管の温度はその音速に影響を与えるため、音速を係数とする超音波厚さ検査において精度を担保するためには温度を正確に把握することが重要である。よって、EMAT の実機適用において温度は検討し

なければならない項目である。今後は、温度について、すなわち配管に設置した EMAT 自身でその音速を評価する手法や、斜角超音波やラム波を用いてより広い範囲を探傷する手法など、残る実機適用への課題についての研究が求められる。

本論文では発電プラントの配管の維持、管理について述べたが、配管はいたるところに存在している。例えば船舶においても FAC による配管の減肉が問題になっている^[74]。海の上での配管の破断は生死に直結するため許されないことである。FAC は環境が変わらない限り急激に進むような減肉ではないため、船舶においても発電プラントと同様に定期的な配管の厚さ測定を行っている^[15]。EMAT を断熱材下に常時設置しておくことで、定期点検時に断熱材を剥ぐことなく配管厚さ測定ができるため、検査時間の短縮が期待できる。また、センサの設置場所がずれないためより正確な減肉率を評価することが可能になる。したがって、本論文で得られた成果を活用することで、検査コストの削減だけでなく、より正確に配管の健全性が確保されることが期待できる。このように、船舶や他のプラント、例えば化学プラントなどにおいても、本論文の成果は広く社会に貢献できるものと考えている。

参考文献

- [1] C. Schefski, J. Pietralik, T. Dyke and M. Lewis, “A physical model to predict wear sites engendered by flow-assisted corrosion”, US DOE Rep, pp. 149-154, 1995.
- [2] B. Chexal et al., “Flow-accelerated corrosion in power plants”, EPRI report, TR-106611, 1996.
- [3] R. B. Dooley and, V. K. Chexal, “Flow-accelerated corrosion of pressure vessels in fossil plants”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 77, Issues 2-3, pp. 85-90, 2000.
- [4] T.R. Allen, P.J. King, and L. Nelson, “Flow Accelerated Corrosion and Cracking of Carbon Steel Piping in Primary Water Operating Experience at the Point Lepreau Generating Station”, Proceedings of the 12th International Conference, pp. 773-784, 2005.
- [5] K. D. Efirid, “Flow accelerated corrosion testing basics”, Pap Corros, p. 16, 2006.
- [6] 松村 昌信, “高温純水中の炭素鋼鋼管壁に生じる異常減肉(エロージョン・コロージョン)の特徴とメカニズム”, 材料と環境, Vol. 56, pp. 187-195, 2007.
- [7] 山上 勝彦, 平野 伸朗, 中村 隆夫, “加圧水型原子力発電所における流体流れによる配管減肉事象のデータ分析について”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 74, No. 745, pp. 1880-1889, 2008.
- [8] 磯本 良則, “エロージョンからエロージョン・コロージョン”, 材料と環境, Vol. 57, pp. 15-21, 2008.
- [9] 宮坂 松甫, 杉山 憲一, 野口 学, 八鍬 浩, “流体機械・環境装置のエロージョン・コロージョン”, 材料と環境, vol. 57, 111-117, 2008.
- [10] 宮澤 正純, “化学プラントでのエロージョン・コロージョン事例”, 材料と環境, Vol. 57, pp. 118-121, 2008.
- [11] 矢野 昌也, 石丸 祐, 森 久和, “化学プラントで発生するエロージョン損傷と検査”, 材料と環境, Vol. 57, pp. 122-130, 2008.
- [12] 磯本 良則, 宮田 寛和, “液滴衝突エロージョン現象と実用材料の寿命予測”, 材料と環境, Vol. 57, pp. 146-152, 2008.

- [13] 稲田 文夫, 米田 公俊, 森田 良, 藤原 和俊, 古谷 正祐, “配管減肉メカニズムに関する流体力学的考察”, 材料と環境, Vol. 57, pp. 218-223, 2008.
- [14] (社)日本機械学会, “発電用原子力設備規格加圧水型原子力発電所配管減肉管理に関する技術規格”, Vol. JSME S NG-1 2006, 2006.
- [15] (財)日本海事協会, “船用配管板厚減肉の設計,点検指針”, (財)日本海事協会, 2007.
- [16] 小林 英男, “エロージョン・コロージョンの損害事故と解析”, 材料と環境, Vol. 57, pp. 5-8, 2008.
- [17] 宮園 昭八郎, “サリ-原子力発電所の配管破断事故”, 日本原子力学会誌 Vol. 29, No. 11, pp. 952-969, 1987.
- [18] 片山 正一郎, “関西電力美浜発電所 3 号機二次系配管破損事故への対応”, 火力原子力発電, Vol. 56, No. 1, pp. 4-11, 2005.
- [19] 酒井 潤一, 伊藤 慶, 木原 重光, “エロージョン・コロージョンのテクニカルモジュール”, 材料と環境, Vol. 57, pp. 211-217, 2008.
- [20] F. Moser, L.J. Jacobs and J. Qu, “Modelling elastic wave propagation in wave guides with the finite element method”, NDT & E International, Vol. 32, pp. 225-234, 1999.
- [21] W. Boettger, H. Schneider, and W. Weingarten, “Prototype EMAT system for tube inspection with guided ultrasonic waves”, Nucl Eng Des, Vol.102, No.3, pp. 369-376, 1987.
- [22] L. E. Sanchez-Caldera, P. Griffith, E. Rabinowicz, “The Mechanism of Corrosion-Erosion in Steam Extraction Lines of Power Stations”, J. Eng. Gas Turbines Power, Vol. 110, Issue 2, pp. 180-184, 1988.
- [23] 波木井 順一 他, “沸騰水型原子力発電所の配管減肉に関するフィールドデータの分析”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 75, No. 749, pp. 118-126, 2009.
- [24] 梅本 明, 斉藤 伸一, “保温材下の配管腐食状況の渦電流探傷法による非破壊検査技術”, 火力原子力発電, Vol.50, No.6, pp.62-68, 1999.
- [25] 古海 寛, “保温材上から防食材上からの肉厚測定-INCOTEST-”, 非破壊検査, Vol. 55, No. 3, pp.109-113, 2000 .
- [26] R. Scottini, C.H.P. Wassink and T. Kooren, “Condition assessment of components susceptible to Flow Accelerated Corrosion”, Proceeding of FAC 2008, 2008.
-

-
- [27] 丹羽 昇, “超音波計測”, 昭昇堂, p. 212, 1982.
- [28] 近角 聰信, “物性科学入門”, 裳華堂, pp. 128-130, 1999.
- [29] The european parliament, “DIRECTIVE 2002/95/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL”, 2003.
- [30] R. L. Wegel and H. Walther, “Internal dissipation in solids for small cyclic stains”, Physics, Vol. 6, pp. 141-157, 1935.
- [31] R. H. Randall, F.C. Rose and C. Zener, “Intercrystalline Thermal currents as a source of internal friction”, Phys. Rev., Vol. 56, pp. 343-348, 1939.
- [32] R. B. Thompson, G. A. Alers and M. A. Tennison, “Applications of direct electromagneteic lamb wave generation to gas pipeline inspection”, in IEEE Ultrasonic Symp. Proc., pp. 91-93, 1972.
- [33] R. B. Thompson, “A model for Electromagnetic generation and detection of rayleigh and lamb waves”, IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, SU-20, pp. 340-346, 1973.
- [34] K. Kawashima, “Nondestructive characterization of texture and plastic strain ratio of metal sheets with electromagnetic acoustic transducers”, I Acoust. Soc. Am., Vol. 72, pp. 681-690, 1990.
- [35] K. Kawashima and O. B. Wright, “Resonant electromagnetic excitation and detection of ultrasonic waves in thin sheets”, I Appl. Phys., Vol. 72, pp. 4830-4839, 1992.
- [36] K. Kawashima, “Experiments with two types of electromagnetic ultrasonic transducers”, I Acoust. Soc. Am., Vol. 60, pp. 365-373, 1976.
- [37] B. W. Maxfield and C.M. Fortunko, “The design and use of electromagnetic acoustic wave transducers”, Material Evaluation, Vol. 41, pp. 1399-1408, 1983.
- [38] B. W. Maxfield, A. Kuromoto and J.K. Hulbert, “Evaluating EMAT designs for selected applications”, Materials Evaluation, Vol. 45, No. 10, pp. 1166-1183, 1987.
- [39] H. M. Fros, “Electromagnetic-ultrasonic transducer: Principles practice and applications”, Physical Acoustics, Vol. 14, W.P. Mason and R.N. Thurston eds Academic Press, New York, pp. 179-275, 1979.
- [40] 須山昇司, 森本一夫, “電磁超音波(EMAT)を用いた広域部の探傷”, 非破壊検査, Vol.
-

- 46, No. 5, pp. 320-325, 1997.
- [41] M. Hirao, H. Ogi and H. Fukuoka, "Resonance EMAT system for acoustoelastic stress evaluation in sheet metals", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 64, Issue 11, pp. 3198-3205, 1993.
- [42] 平尾 雅彦, 萩 博次, "電磁超音波共鳴による疲労過程の非接触モニタリング", *非破壊検査*, Vol. 51, No. 2, pp. 79-82, 2002.
- [43] K. Mirkhani et al., "Optimal design of EMAT transmitters", *NDT&E International*, Vol. 37, pp. 181-193, 2004.
- [44] R. Ludwig, Z. You and R. Palanisamy, "Numerical simulations of an electromagnetic acoustic transducer-receiver system", *Magnetics, IEEE Transactions*, Vol. 29, No. 3, pp. 2081-2089, 1993.
- [45] M. Hirao, H. Fukuoka and Y. Miura, "Scattering of Rayleigh surface waves by edge cracks - numerical", *Simulation and experiment, J Acoust Soc Am*, Vol. 72, pp. 602-606, 1982.
- [46] J. K. Hu, Q. L. Zhang, and D. A. Hutchins, "Directional characteristics of electromagnetic acoustic transducers", *Ultrasonics*, Vol. 26, No. 1, pp. 5-13, 1988.
- [47] R. B. Thompson, "Physical principles of measurements with EMAT transducers", *Physical Acoustics*, Vol.19, Academic Press, New York, pp.157-200, 1990.
- [48] K. Kawashima, "Very high frequency EMAT for resonant measurement", *Proc. IEEE Ultrasonic Symposium*, No. 2, pp. 1111-1119, 1994.
- [49] Hirotsugu Ogi, "Field dependence of coupling efficiency between electromagnetic field and ultrasonic bulk waves", *J. Appl. Phys.*, vol. 82, No. 8, pp. 3940-3949, 1997.
- [50] M. Hirao, "An SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection", *NDT & E Int.*, Vol. 32, pp. 127-132, 1999.
- [51] K. J. Coakley, A. V. Clark, and C. S. Hehman, "Empirical modeling of electromagnet accoustic transducer data", *PB Rep*, p. 24, 1999.
- [52] D. MacLauchlan, S. Clark, B. Cox, T. Doyle, and B. Grimmett, "Recent advancements in the application of EMATs to NDE", *Proc. of the 16th WCNDT*, Montreal, Canada., 2004.
-

-
- [53] 山崎 友裕, 河部 大輔, 大谷 俊博, 平尾 雅彦, “電磁超音波センサによる縦波を用いた銅パイプの探傷”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 70 No. 690, pp. 62-69, 2004.
- [54] 三谷 欣也, 中山 吉晴, 金井 英一, 望月 正人, 豊田 政男, “電磁超音波共鳴スペクトルによる鋼板の減肉評価”, 溶接学会論文集, Vol. 25, No. 4, pp. 507-513, 2007.
- [55] 村山 理一, “電磁超音波センサの基礎”, 非破壊検査, Vol. 51, No. 2, pp. 62-67, 2002.
- [56] 白井 武広, 町島 祐一, “光ファイバを用いた電磁超音波共振法による金属板厚測定”, 電子情報通信学会技術研究報告 光ファイバ応用技術, Vol. 108, No.245, pp. 19-22, 2008.
- [57] D. R. Allen and R. Martin, “Measuring boiler tube wall thickness in thermal power plants using electromagnetic acoustic transducers (EMATs)”, AEA Technology Plc, 1985.
- [58] B. J. Smith, R. Martin and R.P. Holt, “The use of EMATs for wall thickness measurements on corroded pipes”, Proc. 6th Int Conf on NDT Methods, Strasbourg, p. 49, 1986.
- [59] 山崎 友裕, 河部 大輔, 大谷 俊博, 平尾 雅彦, “電磁超音波センサを用いた最適波形法による鋼管の減肉検査”, 日本機械学会論文誌(A 編), Vol. 67, No. 659, pp. 169-174, 2001.
- [60] S. Uchida, M. Naitoh, Y. Uehara, H. Okada, N. Hiranuma, W. Sugino, S. Kishizuka and D. H. Lster, “Evaluation of wall thinning rate with the coupled model of static electrochemical analysis and dynamic double oxide Layer analysis”, Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 46, No. 1, pp. 31-40, 2009.
- [61] 白井 武広, 町島 祐一, “光ファイバを用いた電磁超音波共振法による配管減肉測定”, 配管技術, vol. 51, No. 14, pp. 67-71, 2009.
- [62] 川島 捷宏, “高温ならびに低温における電磁超音波トランスデューサー(EMAT)”, 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講演予稿集, Vol. 17, pp. 299-300, 1996.
- [63] 徐 陽, 田川 明広, 上田 雅司, 山下 卓哉, “高温電磁超音波探触子の開発”, 機械材料・材料加工技術講演会講演論文集 Vol. 12, pp. 389-390, 2004.
- [64] 田川 明広, 小島 史男, “ハイブリッド計測による配管ヘルスマonitoring法の研究”, 保全学, Vol. 9, No. 1, pp. 45-50, 2010.
-

- [65] 近角 聰信, “物性化学入門”, 裳華堂, pp. 263-269, 1999.
- [66] Mansgar Wilbrand, “Quantitative modeling and experimental analysis of the physical properties of electromagnetic-ultrasonic transducers”, *Review of Progress in QNDE* 7, pp. 671-680, 1987.
- [67] H. Ogi, M. Hirao and T. Hinda, “Ultrasonic attenuation and grain size evaluation using electromagnetic acoustic resonance”, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 98, pp. 458-464, 1995.
- [68] H. Ogi, M. Hirao, T. Hinda and H. Fukuoka, “Absolute measurement of Ultrasonic attenuation by electromagnetic acoustic resonance”, in *Rev. of Progress in QNDE*, Vol. 14, pp. 1601-1608, 1995.
- [69] H. T. Banks, F. Kojima, and W.P. Winfree, “Boundary estimation problems arising in thermal tomography”, *Inverse Problems*, Vol. 6, No. 4, pp. 897-921, 1990.
- [70] H. T. Banks and F. Kojima, “Identification of material damage in two dimensional domains using SQUID based NDE System”, *Inverse Problems*, Vol. 18, No. 6, pp. 1831-1855, 2002.
- [71] F. Kojima, D. Kosaka, and D. T. Nguyen, “Sizing methodology of piping wastage using electromagnetic acoustic transducer, Proc. of the 7th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components”, *Proc. of the 7th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components*, 2009.
- [72] D. T. Nguyen and F. Kojima, “Identification of sub-surface defect parameters in plates using electromagnetic acoustic interaction”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, pp. 1009-1015, 2010.
- [73] M. Yoshida, T. Hirasaki, F. Watanabe, S. Nukaga and K. Takamori, “Wall Thinning of Steel Pipes downstream orifice by Flow Accelerated Corrosion in High Temperature water”, *Proc. 57th Japan Conf. Materials and Environments*, pp. 1111-1119, 2010.
- [74] 宋 玉中, 椎原 裕美, 松下 久雄, 中井 達郎, 永山 友哉, “船用蒸気プラント配管の流れ加速腐食による減肉について”, *日本船舶海洋工学会論文集* Vol. 3, pp. 119-124, 2006.
-

研究業績

1. 学術論文・国際会議(査読付)

- [1] Daigo KOSAKA and Fumio KOJIMA, “Quantitative Evaluation of Corrosion Shape on Back Surface of SUS Samples by EMAT”, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 32, pp. 388-393, 2009
- [2] Daigo KOSAKA, Fumio KOJIMA and Hiroshi YAMAGUCHI, “Application to sizing methodologies of pipe wall thinning and visualization of wave propagation by EMAT simulator in nuclear power plant”, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 33, pp. 111-118, 2010
- [3] Daigo KOSAKA, Fumio KOJIMA and Hiroshi YAMAGUCHI, “Quantitative evaluation of wall thinning in pipe wall using electromagnetic acoustic transducer”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, IOS Press, Vol. 33, No. 3-4, pp. 1195-1200, 2010
- [4] Daigo KOSAKA, Fumio KOJIMA, Hiroshi YAMAGUCHI and Kosuke UMETANI, “Monitoring System for Pipe Wall Thinning Management using Electromagnetic Acoustic Transducer”, Japan Society Maintenology, E-Journal of Advanced Maintenance Vol.2, pp.34-42, 2010
- [5] Daigo KOSAKA, Fumio KOJIMA and Kosuke UMETANI, “Pipe Wall Thickness Measurement by Electro-Magnetic Acoustic Transducer using Band Exciting Method”, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 35, pp. 267-274, 2011
- [6] 小坂大吾, 小島史男, 梅谷浩介, “配管厚さ測定への電磁超音波探触子の適用”, 保全学, Vol. 10, No.4, 2012(印刷中)

2. 共著論文・国際会議(査読付)

- [1] Fumio KOJIMA, Daigo KOSAKA and Hiroshi YAMAGUCHI, “Visualization of wave propagation by EMAT simulator and application to sizing methodologies of pipe wall thinning in nuclear power plant”, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 33, pp. 111-118, 2010
- [2] Fumio KOJIMA, Daigo KOSAKA and Kosuke UMETANI, “Continuous Surveillance Technique for Flow Accelerated Corrosion of Pipe Wall Using Electromagnetic Acoustic Transducer”, AIP Conference Proceedings, Vol. 1335, pp. 1341-1346, 2011
- [3] Fumio KOJIMA, Daigo KOSAKA and Kosuke UMETANI, "Pipe wall thickness measurements on flow accelerated corrosion by electro-magnetic acoustic transducer”, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, IOS Press, to appear

3. 講演発表

- [1] Daigo KOSAKA and Fumio KOJIMA, “Corrosion Shape Recovery by Electromagnetic Acoustic Transducer and its Application to Pipe Wastage Management”, SICE Annual Conference 2008 in Chofu, p. 184, 2008
- [2] 小坂 大吾, 小島 史男, “電磁波超音波法によるステンレス系配管の減肉サイジング”, 第 20 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2008
- [3] 小坂 大吾, 小島 史男, 鳥越 誉史, “電磁超音波による減肉管理手法の検討”, 日本非破壊検査協会秋季大会講演概要集, pp. 131-132, 2008
- [4] 小坂 大吾, 小島 史男, “電磁超音波法による減肉の定量評価”, 日本保全学会第 5 回 学術講演会, 2008
- [5] 小坂 大吾, 小島 史男, 鳥越 誉史, “EMAT を用いた減肉形状推定の検討”, 第 17 回 MAGDA コンファレンス in 日立, 2008
- [6] Daigo KOSAKA and Fumio KOJIMA, “Quantitative Evaluation of Corrosion Shape on Back Surface of SUS Samples by EMAT”, The 13th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE'2008), 2008 (poster)

-
- [7] 小坂 大吾, 小島 史男, 山口 紘史, “EMAT を用いた配管減肉寸法計測法”, 日本保全学会第 6 回学術講演会, 2009
- [8] Daigo KOSAKA, Fumio KOJIMA and Hiroshi YAMAGUCHI, “Visualization of wave propagation by EMAT simulator and application to sizing methodologies of pipe wall thinning in nuclear power plant”, The 14th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE’2009), 2009
- [9] Daigo KOSAKA, Fumio KOJIMA and Hiroshi YAMAGUCHI, “Quantitative evaluation of wall thinning in pipe wall using electromagnetic acoustic transducer”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics (IJAEM) for the ISEM ’ 2009 (International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics) Special Issue, 2009 (poster)
- [10] 小坂 大吾, 小島 史男, 梅谷 浩介, “流れ加速腐食を想定した配管厚さ測定への電磁超音波探触子の適用について”, 日本保全学会第 7 回学術講演会, 2010
- [11] 小坂 大吾, 小島 史男, 梅谷 浩介, “電磁超音波共鳴法を用いた配管減肉計測”, 第 22 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD22), 2010
- [12] Daigo KOSAKA, Fumio KOJIMA and Kosuke UMETANI, “Pipe Wall Thickness Measurement by Electro-magnetic Acoustic Transducer using Band Exciting Method”, The 15th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE’2010), 2010
- [13] Daigo KOSAKA, Fumio KOJIMA and Kosuke UMETANI, “Pipe Wall Thickness Measurement of Flow Accelerated Corrosion by Electro-Magnetic Acoustic Transducer”, The 16th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE’2011), 2011
- [14] Daigo KOSAKA, Fumio KOJIMA and Hiroki TABATA, “Exact Pipe Wall Thinning Management with Flow Accelerated Corrosion using Electro-Magnetic Acoustic Transducer”, International workshop on simulation and modeling related to computational science and robotics technology (SiMCRT2011), pp. 29-30, 2011
-

4. 受賞

- [1] 日本AEM学会, 平成20年度 MAGDA コンファレンス, 優秀講演論文賞
小坂 大吾, 小島 史男, 鳥越 誉史, “EMAT を用いた減肉形状推定の検討”
- [2] 日本保全学会, 平成22年度第7回学術講演会第4回産学共同セッション, 金賞
小坂 大吾, 小島 史男, 山口 紘史, “EMAT を用いた配管減肉寸法計測法”

謝辞

本論文は、神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部 小島史男 教授が、経済産業省 原子力安全・保安院(NISA)の「高経年化対策強化基盤整備事業」について委託を受け、著者が神戸大学大学院工学研究科情報知能学専攻 博士後期課程在籍中に小島研究室 NISAプロジェクトチームにおいて行った研究の EMAT に関連する部分をまとめたものである。小島教授には、指導教官として本研究に携わる機会を与えていただき、また本論文を執筆するに当たり、筆の遅い著者に対して 4 年半の長期に渡って指導していただいた。ここに深謝の意を表す。

神戸大学大学院システム情報学研究科 的場修教授、同大学院工学研究科 阪上隆英教授には本論文に多大な助言をいただいた。ここに感謝の意を表す。

株式会社原子力安全システム研究所 黒住保夫氏、藤村公也氏、藤堂二彦氏には、NISA の研究を行うに当たり助言、援助をいただいた。特に関西電力株式会社 堺港火力発電所における実機配管減肉測定データは、氏らの協力なくして得ることのできなかつた貴重なデータである。ここに感謝の意を表す。

関西電力株式会社 坂下氏、関電プラント株式会社 山下浩司氏、東京電力株式会社 技術開発研究所 吉田正志氏、平崎敏史氏には、貴重な供用配管を提供いただいた。本配管がなければ本論文は成り立たなかつた。ここに感謝の意を表す。

日本原子力研究開発機構 田川 明広氏には、EMAT の実験設備についてご教授いただいた。本論文はそこから発展している。ここに感謝の意を表す。

東北職業能力開発大学校付属 青森職業能力開発短期大学校 橋本光男校長(兼 職業能力開発総合大学校 電気システム工学科 教授)には、博士後期課程に進学する機会をいただいた。さらに職業能力開発総合大学校 電気システム工学科での業務において、多大なるフォローをいただいた。ここに感謝の意を表するとともに、今後は今まで以上に業務にまい進するつもりである。

大分大学 工学部 機械・エネルギーシステム工学科 後藤雄治准教授には、公私に及ぶ励ましのお言葉をいただいた。ここに感謝の意を表す。

神戸大学関係各位には、在学中に便宜を図っていただいた。ここに感謝の意を表す。特に、小島研究室博士前期課程 鳥越誉史君、山口紘史君、梅谷浩介君、田端大樹君には、

謝辞

本研究の実験に協力をしていただいた。ここに感謝の意を表す。また、同研究室博士後期課程 福井航氏には、同研究室での研究活動に関する様々な便宜を図っていただいた。快適すぎてお互いの卒業が遅れた感はあるが、ここに感謝の意を表す。

最後に、妻美穂、両親には、著者の研究活動及び本論文の取りまとめに理解を示し、協力いただいた。ここに感謝の意を表す。ありがとう。