



# 電磁超音波を用いた配管ヘルスマニタリングセンサの研究

田川, 明広

---

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2011-03-25

(Date of Publication)

2011-10-19

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5240

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005240>

※ 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

電磁超音波を用いた  
配管ヘルスマニタリングセンサの研究

田川 明広

神戸大学大学院 工学研究科 情報知能学専攻



## 目次

要旨	i
第1章 緒論	1
1.1 運転中モニタリングの必要性	1
1.2 電磁超音波探触子(EMAT)の歴史	4
1.3 研究目的	5
第2章 計測原理	7
2.1 従来手法	7
2.1.1 EMAT の超音波発生原理	7
2.1.2 垂直 EMAT の原理	9
2.1.3 斜角 EMAT の原理	12
2.1.4 パルスエコー(PE)法	14
2.1.5 電磁超音波共鳴(EMAR)法	16
2.1.6 熱膨張	17
2.2 提案手法	18
2.2.1 パルスエコー共振(PER)法	18
2.2.2 ハイブリッドセンシングの概念	20
2.2.3 相互相関法を用いた水温測定法	21
2.2.4 欠陥モニタリング用位置同定法	22
第3章 配管減肉モニタリング用センサの研究	25
3.1 緒言	25
3.2 EMAT の試作	26
3.2.1 開発目標	26
3.2.2 永久磁石材料の選択	27
3.2.3 試作	31
3.3 試験方法	33
3.3.1 測定システム	33

3.3.2 高温時の磁石ノイズフィルタ	35
3.4 試験結果	37
3.4.1 室温試験	37
3.4.2 高温試験	49
3.4.3 耐久試験	62
3.4.4 センサ設置方法	72
3.5 結言	73
第4章 ハイブリッドセンシング用センサの研究	76
4.1 緒言	76
4.2 EMAT の試作	77
4.2.1 設計条件	77
4.2.2 設計と試作	79
4.3 試験方法	85
4.3.1 測定システム	85
4.3.2 測定フロー	86
4.4 試験結果	88
4.4.1 コイルの直流抵抗測定	88
4.4.2 減肉測定	92
4.4.3 水温測定	122
4.5 結言	130
第5章 欠陥モニタリング用センサの研究	132
5.1 緒言	132
5.2 EMAT の試作	133
5.2.1 磁石設計	133
5.2.2 ダブルコイル EMAT の設計	136
5.2.3 試作	139
5.3 試験方法	140
5.3.1 試験条件	140
5.3.2 測定システム	140
5.4 試験結果	146
5.4.1 周波数依存性の確認	146
5.4.2 距離振幅特性試験	153

5.4.3 欠陥検出性試験	167
5.4.4 従来研究との比較	176
5.5 結言	179
第 6 章 結論	181
謝辞	184
参考文献	185



## 要旨

日本の原子力発電所の安全は 13 ヶ月に 1 度実施される時間基準保全(TBM: Time Based Maintenance)により確保されてきた。そのうち、冷却系配管の TBM には非破壊検査が適用されてきた。13 ヶ月毎の検査周期は科学的根拠が乏しいことが指摘され、科学的・合理的保全活動が求められてきた。その結果、日本の原子力安全保安院は原子力発電所の安全を担保しつつ稼働率向上することを目的に 2009 年に発電所毎に科学的・合理的な検査方法や検査期間を設定できる保全プログラムを導入した。保全プログラムの適用により最長 18 ヶ月までの連続運転が可能となった。この保全プログラムを有効活用するためには状態基準保全(CBM: Condition Based Maintenance)と TBM を最適化して利用することが望ましく CBM の有効性を定量的に確認する研究も行われている。状態監視を行う手段として非破壊検査技術を応用したモニタリングが挙げられる。モニタリングにより原子力発電所の安全性が向上するのは医療を例にとると理解しやすい。

臨床医の病理診断(循環器疾患を例) は、1.病歴聴取、2.身体所見、3.胸部レントゲン、4.心電図、5.心エコー図の主なる 5 つの手段から成り立つ。医師は、各々の検査の各疾患に対する限界を考慮し、総合的に診断する。これを原子力発電所に当てはめて考えると、1.過去の保守・補修履歴、2.プラント所見、3.非破壊検査、4&5.状態監視(以下、モニタリング)となる。医師の場合、身体所見把握は、問診により情報収集、情報評価、仮説生成、仮説評価し、診断戦略を立て検査に繋げられるが、原子力発電所の場合は直接問診はできないことから、モニタリングによりプラント挙動を把握し、運転員や保守員が所見として把握できることが重要となる。人間が、診断や判断を行う過程は、様々な情報を総合的に判断している。これにはマルチモーダル情報処理が必要である。モニタリングによる状態基準保全導入に対し、コストミニマムで従来 of 時間基準保全よりも安全性が向上することは事業者が CBM をスムーズに導入する必要条件にもなる。

モニタリングの対象は、ポンプなどの動的機器と配管などの静的機器がある。動的機器のモニタリングは実用化されているが、静的機器の状態監視については実用化には至っていない。静的機器の場合、測定対象が広範囲になることから広範囲をスクリーニングする技術と局所的だが高精度で測定し事象の進展を確認する技術が必要となる。

特に 2004 年 8 月に 11 名の死傷者を出した関西電力美浜原子力発電所 3 号機の二次系配管破損事故以降、減肉モニタリングの関心が高まっている。

そこで、本論文では原子力発電所の動脈とも言える静的機器の冷却系配管を



対象とした局所モニタリング手法の研究を行った。モニタリング対象として、軽水炉でも高速炉でもモニタリング環境条件が同じである水・蒸気系配管を選び、配管減肉、配管温度、配管内流体温度、き裂欠陥の4種類を対象とした。

冷却系配管の局所モニタリング技術の実用化に際し、次の4つの課題を解決しなければならない。

1つ目は、放射性廃棄物を出さない手法を選定することである。非破壊検査手法である UT(Ultrasonic testing)や PT(Penetrant Testing)では接触媒質や浸透液が必要であり、これらの原子力発電所の放射線管理区域での利用は放射性廃棄物の増加につながる。

そこで、本論文は高温測定可能で接触媒質が不要な電磁超音波探触子(EMAT : Electromagnetic acoustic transducer)を用いた研究を行った。

2つ目は、高温環境中でも高精度で測定できることである。新しい測定手法を提案し有効性を検証した。

減肉モニタリング用 EMAT は提案したパルスエコー共振(PER)法により 200°Cの高温環境下でも高精度な測定を行うことを確認した。従来の EMAT によるパルスエコー(PE)法の測定精度は  $4 \pm 0.3\text{mm}$  であった。しかし、PER 法を用いた場合、炭素鋼、ステンレス鋼ともに  $2 \pm 0.1\text{mm}$  以下の測定精度で減肉測定可能であることを確認した。また、磁石ノイズを除去できる構造に変更することで、200°Cで  $2 \pm 0.03\text{mm}$  の測定精度を達成した。

欠陥モニタリング用 EMAT は圧力容器板厚に相当する 50mm と配管に相当する 14.3mm に対し、幅 12.5mm、深さ 20%に相当する欠陥を信号対ノイズ比 2 以上で検出できることを確認した。従来研究されてきた、欠陥検出用 EMAT は機械的スキャンが必要であった。しかし、EMAT 設置に大きなコストが発生し、装置自体も大きくなるためモニタリングを行うには機械的スキャンはできない。そこで、従来研究されていたシングルコイル型 EMAT ではなく送受信を分割したダブルコイル型 EMAT を研究した。磁石構造は従来の磁石構造である PPM 構造より 1.4 倍の磁束密度になる Halbach 構造を採用した。また、欠陥同定法に用いる超音波の屈折角は受信波を周波数分析したピーク周波数を用いて算出する手法を用いることで同定精度が向上することが確認できた。

3つ目は、原子炉運転中温度に耐えることである。耐熱性だけでなく 18ヶ月の連続運転に耐えることができる耐久性も要求される。

EMAT の 200°Cの高温特性試験と 18ヶ月に余裕をみた高温耐久性試験を行った。その結果、15000時間(21ヶ月)以上の高温耐久性が確認された。

4つ目は、より多くの情報が1つのセンサで得られることができればプラント診断を行う際に有利だということである。そこで、1つのセンサで複数の物理量を測定できるハイブリッドセンシングを提案、検証した。

測定対象は、配管表面温度、配管減肉および内部流体温度である。この 3 つの物理量を 1 組の EMAT で測定するが、縦波と横波を同時に送受信するためにセンサデザインの見直しを行い、各物理量を試験で測定することで成立性を確認した。

配管表面温度計は、EMAT コイルに流れる直流抵抗値の変化を測定することで測定する。試験の結果、実際の配管表面温度と EMAT コイルの直流抵抗値の間に決定係数として 0.99 以上の一致を確認することができた。次に配管減肉は高温での磁石ノイズ低減化を図った結果、 $2\text{mm} \pm 0.03\text{mm}$  の精度で測定可能であることを確認した。最後に内部流体として  $90^{\circ}\text{C}$  までの水温の測定試験を行った。水中の超音波受信波形は合成波であるため、基準波形と受信波形の相関係数を求めることで受信位置を把握し、音速変化を温度に変換することで水温測定が可能であることを確認した。ハイブリッドセンシングのメリットは、同一箇所でも測定できることである。通常、他の場所に別途温度計を設置するか補償銅線が必要であるが、ハイブリッドセンシング EMAT の場合、場所に依存する精度誤差はない。また、自ら温度を測定するため、温度補正を 1 つのセンサで行うことが可能である。これは多くのデータをマルチモーダルに検出したいプラント診断には重要である。また、EMAT 部品の各価格は安価であり、1 プラントあたり数千から数万の設置を必要とする実際のプラント適用を考慮した場合経済的にも優位である。スケールメリットを考えた場合、一つのセンサは、約 10 ドル以下で製造できると推算した。

本論文は、上記 4 つの課題を全て解決した。今後、配管のヘルスマモニタリングを実施するには、センシングによる状態変化の把握と減肉やき裂の進展具合の予測、予測から導かれる補修を含めた保全方法の確立が必要である。本論文はこの中のセンシングによる状態変化の把握を可能とするセンサ技術の研究を実施した。研究の結果、モニタリングに適用可能なセンサと測定手法を提案し、試験により検証することができた。今後は、減肉や欠陥の進展予測法や補修方法の研究が必要である。



# 第 1 章

## 緒論

### 1.1 運転中モニタリングの必要性

日本の原子力発電所の安全は 13 ヶ月に 1 度実施される時間基準保全(TBM: Time Based Maintenance)により確保され、冷却系配管の TBM には非破壊検査を適用してきた[J1]。TBM は設備の使用(運転)時間や暦時間を基に計画的、定期的に保全を行う手法であるが、検査周期である 13 ヶ月に科学的根拠が乏しいことが指摘され、科学的・合理的保全活動が求められてきた[N3]。その結果、設備診断技術により設備の運転中状態監視(ヘルスマニタリング)を行い、その診断結果に基づき設備の運転時間や暦時間に関係なく保全を行う状態基準保全(CBM: Condition Based Maintenance)の導入が求められた[G3]。特に 2004 年 8 月に 11 名の死傷者を出した関西電力美浜原子力発電所 3 号機の二次系配管破損事故(配管破損事故)[T9]以降、減肉モニタリングの関心が高まった。そこで、日本の原子力安全・保安院は原子力発電所に CBM が導入できる保全プログラム制度を 2009 年 1 月に導入した。これにより、設備の安全を担保しつつ稼働率向上を図ることができ、科学的・合理的な検査方法や検査周期を発電所毎に設定できることとなり、最長 18 ヶ月までの連続運転が可能となった[G3]。CBM のためにモニタリングを適切に行うには、人間がアクセスできない過酷な環境で利用できるモニタリング技術を開発することが必要である。開発する技術には、放射線と高温が組み合わさった環境下で利用でき、検査時に発生する放射性廃棄物を排出しない技術が求められる。

モニタリングによる CBM は本当に有効なのか、CBM により安全性は本当に

向上するののかについては、TBM と CBM の最適な組み合わせを定量的に求め、CBM による安全性向上が理論的に確認される研究[L1]も行われている。また定性的に理解を進めるには医療を例にとるとわかりやすい。医師の病理診断(循環器疾患を例)は、1.病歴聴取、2.身体所見、3.胸部レントゲン、4.心電図、5.心エコー図の主なる 5 つの手段から成り立つ。医師は、各々の検査を各疾患に対する限界を考慮し総合的に診断する[I1]。これを原子力発電所にあてはめて考えると、1.過去の保守・補修履歴、2.プラント所見、3.非破壊検査、4&5.モニタリングとなる。医師の場合、身体所見把握は、問診により情報収集、情報評価、仮説生成、仮説評価し、診断戦略を立て検査に繋げられる[I1]が、原子力発電所の場合は直接問診はできない[K1]ことから、モニタリングによりプラント挙動を把握し、運転員や保守員が所見として把握できることが重要となる。把握した情報を人間が診断や判断を行うには、様々な情報を総合的に判断しなければならない[M1]。そのためには、複数の情報収集し、その情報を総合的に判断できる診断技術が必要となる。しかし、複数の情報収集には複数のセンシングが必要となるが、これにはコスト増を許容しなければならない。モニタリングによる診断技術の導入に対し、投資コストミニマムで従来の TBM よりも安全性が向上することは事業者が CBM をスムーズに導入する必要条件にもなる。モニタリングの対象には、ポンプなどの動的機器と配管などの静的機器がある。動的機器モニタリングは実用化[O1, R1]されているが、静的機器モニタリングについては実用化には至っていない。静的機器の場合、測定対象が広範囲になることから広範囲をスクリーニングする技術[J2, D1, S1]と局所的だが高精度で測定し事象の進展を確認できる技術が必要となる。

そこで、本論文では原子力発電所の動脈とも言える静的機器の冷却系配管を対象とした局所モニタリング手法の研究を行った。モニタリング対象は軽水炉

でも高速炉で配管破損事故を同じ環境である水・蒸気系配管を選び、配管減肉、配管温度、配管内流体温度、き裂欠陥の 4 種類をモニタリング対象とした。冷却系配管の局所モニタリング技術の研究に際し、次の 4 つの課題を解決しなければならない。

1 つ目は、放射性廃棄物を出さない手法を選定することである。一般的な非破壊検査手法である超音波探傷試験(UT: Ultrasonic testing)や浸透探傷試験(PT: Penetrant Testing)では接触媒質や浸透液が必要であり、これらの原子力発電所の放射線管理区域での利用は放射性廃棄物の増加につながる。

2 つ目は、高温環境中でも高精度で測定できることである。新しい測定手法を提案し有効性を検証する。

3 つ目は、原子炉運転中温度に耐えることである。耐熱性だけでなく 18 ヶ月の連続運転に耐えることができる耐久性も要求される。

4 つ目は、より多くの情報が 1 つのセンサで得られることができればプラント診断を行う際に有利だということである。そこで、1 つのセンサで複数の物理量を測定できるハイブリッドセンシング[S2, H4]を提案、検証する。

既存調査[N2]により原子力発電所の冷却系配管の減肉を検査・モニタリングする方法がいくつか[T10\*, X3, O27, H5]挙げられており、その中に電磁超音波探触子(EMAT: Electromagnetic Acoustic Transducer)が含まれている。EMAT は超音波発生原理上、超音波を配管に伝達する際に接触媒質を必要としない。また、原子力発電所内の放射性管理区域では検査のために利用した接触媒質は低レベル放射性廃棄物となるが、接触媒質を利用しない EMAT では放射性廃棄物を出さない。しかし、EMAT には UT に比べ感度が低く検出精度が低いというデメリットがある。そこで、本研究では、モニタリング技術として EMAT を選定し高精度でハイブリッドセンシングできる手法を研究する。

## 1.2 電磁超音波探触子 (EMAT) の歴史

EMAT 研究に先立ち、EMAT の歴史的背景を調査した。EMAT の研究は長い歴史を持っているが、実はその起源は明確になっていない[H2]。電磁超音波法とは、磁石の作るバイアス磁場に高周波電流(バースト波)を流すと被検査体表面に磁歪や渦電流によるローレンツ力が発生する。これが、周期的に変化することにより近接した金属試験体内に超音波を発生させる原理を応用したものである。この周期的変化を真鍮円筒棒内の長手方向の内部摩擦として議論したのが 1935 年の Wegel らの研究[W1]である。その後、1937 年に Randall らが真鍮製の内部摩擦の粒径依存性の測定方法を考案した[R2]。このように、鋼材の内部摩擦により周期的変化がある原理自体は古くから知られており、恐らく音響カップリングさせる研究に長い時間を要した[H2]と考える。

本格的に EMAT が非破壊検査技術として研究されるのは 1970 年代になってからである。Thompson らによってガスパイプライン用の検査装置として研究され [T1]、その後物理モデルを使ってローレンツ力や磁歪の音響カップリングメカニズムの研究が行われた[T2-T8, M2, A1, B1, F1, N1]。1970 年代後半から 1990 年代にかけて、川嶋らが薄い金属に対して電磁超音波の発生を試みる[K2, K3]。数々の研究[C1, J3, J4, F2]がなされるが実用化するには検出感度が低くいため十分な検出精度を得ることが出来なかった。そこで、平尾や荻らは 1990 年代から 2000 年代に入り、電磁超音波共鳴法(EMAR: Electromagnetic Acoustic Resonance)の研究を行う。これは、電磁超音波の周波数を挿引し、超音波を共鳴させることで検出感度を飛躍的に向上させるものであった[H1, O2-O26, P1]。

電磁超音波にはいくつかの利点が存在する。前述のように、接触媒質を必要としないことや高温や放射線下でも利用できることであるが、水平せん断波である SH 波(Shear Horizontal wave)を発生させることができる唯一の方法であるこ

とも大きな利点である[H2]。この利点は、斜角に超音波を打ち込む欠陥検出を行う場合に有効である。圧電素子で発生させる横波は超音波を被検査体に斜めに入射させる。入射された超音波は欠陥で反射し圧電素子で受信されるが欠陥で反射する際に縦波にモード変換する成分が発生し、受信する音圧が低下する[N4]。SH波はモード変換しないため、欠陥検出用 EMAT としての研究も行われている。徐らは、高速増殖炉「もんじゅ」原子炉容器廻り検査装置用に斜角 EMAT を開発した[R3, X1, X3, T11]。しかし、この EMAT は検出感度を向上させるために機械スキャンにより信号の差分処理を行っている[X2]。モニタリングを行う場合には機械スキャン機構は装置の大型化とコスト高につながるため採用できない。本研究では、機械スキャン機構を用いずとも欠陥モニタリング可能な手法も研究する。

### 1.3 研究目的

本研究では、モニタリングに必要な課題解決と EMAT の歴史的背景を踏まえたハイブリッドセンシングを高精度で実施できるセンシング手法の研究を行うことを目的とする。モニタリング対象は、原子炉水・蒸気系であり、運転中温度である 200°C の高温環境下で利用できる EMAT を開発する。

各章の実施概要は以下の通りである。

第 2 章は、従来手法と本研究中で提案する新手法を説明する。提案した新手法は第 3 章から第 5 章で検証する。

第 3 章は、減肉を高精度でモニタリングできる配管減肉モニタリング用 EMAT の研究を行う。従来手法のパルスエコー法(PE: Pulse Echo) [J5, T9] では検出できない高精度な測定手法であるパルスエコー共振法(PER: Pulse Echo Resonance)を提案し、その検証を行う。また、耐熱耐久性の確認も行う。



第4章は、ハイブリッドセンシングについて EMAT を用いて行う。この際に第3章で設計した配管減肉モニタリング用 EMAT を用いて、1組の EMAT により配管表面温度、配管減肉、配管内流体温度の3つの物理量の測定を実施できることを検証する。配管内流体温度の測定には、送信波と受信波の相互相関係数を用いる手法を提案する。

第5章は、欠陥モニタリング用 EMAT の研究を行う。従来手法では機械スキャン機構が必要であったが機械スキャン機構が不要なダブルコイル EMAT を考案する。また、磁石構造には従来の磁石構造に比べ約2倍の感度向上が期待できる Halbach 構造を採用する[X2]。さらに、欠陥位置同定法についても新しい提案を行う。

第6章は、研究の総括を行う。

## 第 2 章

### 計測原理

#### 2.1 従来手法

##### 2.1.1 EMAT の超音波発生原理

EMAT による超音波は被検査体の磁性の有無により 2 種類の超音波発生メカニズムを有している。オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)の様な常磁性体の場合はローレンツ力により超音波が発生する。また、炭素鋼(SS400)の様な強磁性体の場合は磁歪力により超音波が発生する。まず、ローレンツ力により超音波が発生する場合の発生原理[G1, B2, K4, M3, T7]を説明する。

EMAT は電磁気的作用により非接触で導体内に超音波を送受信することができる。EMAT を構成する磁石及びコイルのうち、コイルに高周波電流を流すと導体内表面に周期的に変化する交流磁場が生じ、この磁場を打ち消す方向、すなわちコイル電流とは逆方向に渦電流が励起される。渦電流は磁石が作る直流磁場により導体内の自由電子にローレンツ力を励起する。この結果、導体内の結晶格子はフレミングの左手の法則に従ってローレンツ力が働き変位振動となり、被検査体内を超音波として伝搬する。このことを式で表現すると、マクスウェルの方程式より、支配方程式のアンペアの法則とファラデーの電磁誘導法則は

$$\operatorname{rot} H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (2.1.1-1)$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.1.1-2)$$

となり、オームの法則より

$$J = \eta E \quad (2.1.1-3)$$

となる。永久磁石の構成方程式は、

$$B = \mu_0 H + M \quad (2.1.1-4)$$

となる。運動方程式は、

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_i. \quad (2.1.1-5)$$

となる。ここで、 $H(\text{A/m})$  は磁界の強さ、 $D(\text{C/m}^2)$  は電束密度、 $J(\text{A/m}^2)$  電流密度、 $E(\text{V/m})$  は電界の強さ、 $B(\text{T})$  は磁束密度、 $M(\text{T})$  は磁化力、 $f(\text{N/m}^3)$  単位体積当たりの力、そして  $u(\text{m})$  は 弾性変位量である[H2]。

ローレンツ力は、

$$F = J_e \times B_0 \quad (2.1.1-6)$$

である。ここで、 $F$  はローレンツ力、 $J_e$  は渦電流密度そして  $B_0$  は静磁場である [T4]。ローレンツ力の大きさは渦電流と静的磁場によって決定されるので、超音波の振幅は、渦電流や静磁場の大きさに依存する[A2]。

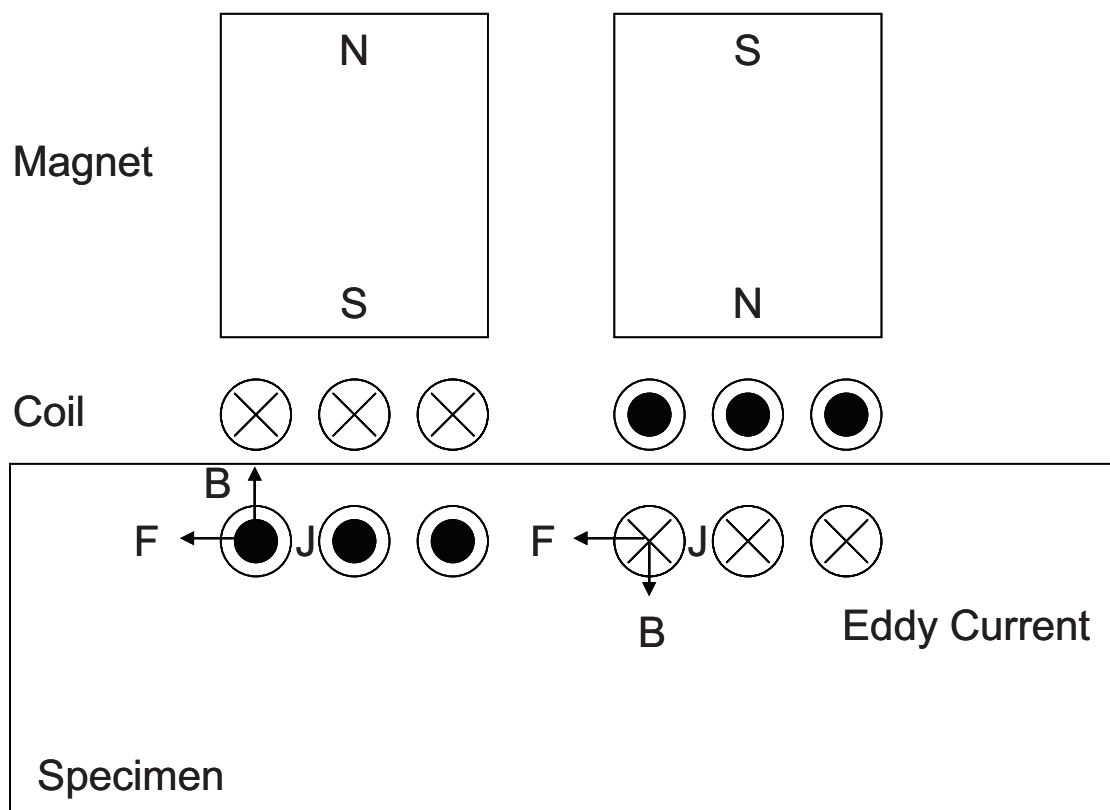
次に強磁性体の場合は、動的な磁歪が主たる波源となる。すなわち、最初バイアス磁場によって表面と垂直方向に伸張していた材料要素が水平な動磁場のため斜め方向に変形を受ける。これはせん断変形であり、周期的な動磁場は振動する磁歪力を生みだし、横波の波源となる。この磁歪力はローレンツ力と同方向に作用するが、強さは磁歪力が支配的である。そして、磁性体に磁場が印加されたときに発生する磁場の方向に応力によって被検査体内に超音波を発生させる[C2, M6]。

### 2.1.2 垂直 EMAT の原理

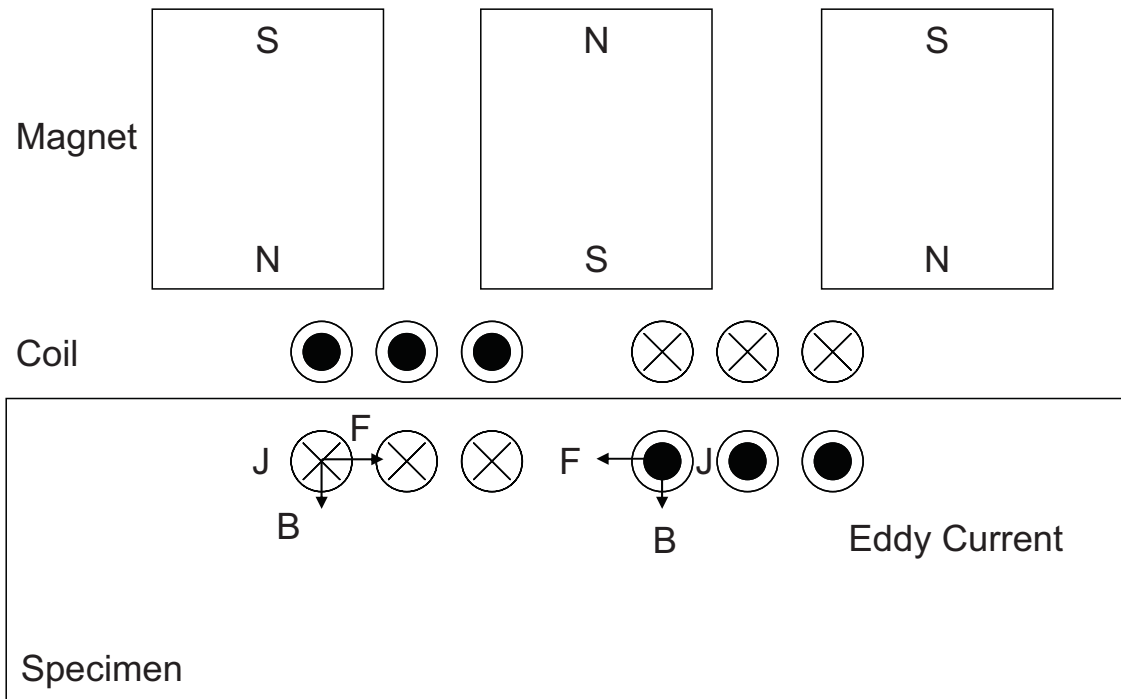
EMAT を用いて超音波を垂直に打ち込む場合、横波である SH 波を発生させる方法と縦波を発生させる方法が必要である。減肉モニタリングを行う場合は横波(SH 波)でよいが、配管を通して液体内に超音波を伝播させるには縦波を発生させなければ液体内を超音波は伝播しない。EMAT 構造は、図 2.1.2-1 と 2.1.2-2 に示すように、コイルと磁石で構成する。

図 2.1.2-1 は、横波(SH 波)発生用 EMAT である。2つの直方体形の永久磁石と渦巻きコイルから構成される。被検査体上でコイルに交流電流を流すと、被検査体表面に垂直方向に横波が発生する。横波の偏向方向(振動方向)は渦巻きコイルの長手方向に垂直な方向で、横波の周波数は交流電流の周波数と等しくなる。送信メカニズムの逆過程により同じ偏向方向の横波を受信することができる。常磁性体の場合、ローレンツ力によって横波が発生するが、強磁性体の場合、磁歪力によって横波が発生する。

図 2.1.2-2 は、縦波発生用 EMAT である。3つの直方体形の永久磁石と渦巻きコイルから構成される。被検査体上でコイルに交流電流を流すと、被検査体表面に垂直方向に縦波が発生する。縦波の周波数は交流電流の周波数と等しくなる。送信メカニズムの逆過程により同じ偏向方向の横波を受信することができる。常磁性体の場合ローレンツ力によって縦波が発生するが、強磁性体の場合磁歪力によって縦波が発生する。



**Fig. 2.1.2-1 Shear horizontal (SH) wave generation mechanism of EMAT for measurement of thickness**



**Fig. 2.1.2-2 Longitudinal wave generation mechanism of EMAT for water temperature measurement.**

### 2.1.3 斜角 EMAT の原理

欠陥モニタリングを行う場合、超音波を斜めに入射させる必要がある。図 2.1.3-1は、渦巻きコイル上に薄い永久磁石を磁極方向が交互に異なるように多数並べた PPM(Periodic Permanent Magnet)磁石配置型 EMAT である。永久磁石の NSNS の周期と同じ周期の SH 波が被検査体内に発生する [T7] ことから、SH 波の波長は永久磁石の厚さの 2 倍となる。このことから励磁周波数  $f$ 、磁石厚さ  $a$ 、屈折角  $\theta$ 、超音波の音速  $C$  には、式 2.1.3-1 が成立する [X2]。

$$f = \frac{C}{2a \sin \theta}. \quad (2.1.3-1)$$

また、式 2.1.3-1 は励磁周波数を変更することで、超音波を入射させる屈折角を変更できることを示している。機械スキャンを行わなくとも励磁周波数を変更し屈折角を変更することで電子スキャンが行える可能性がある。これは、定点固定して欠陥モニタリングを行いながらき裂進展を観察したい場合には有効である。

なお、永久磁石が薄いほど、高周波数の表面 SH 波を送信できるが、磁石が薄すぎる場合、反磁場の影響もあり磁力が弱くなり、磁石の機械強度も弱いため組み立てが困難になる。従来研究では、1mm 以下の薄さの永久磁石は使用できず、通常 1.6MHz 以下の周波数での使用となる [H2] ことが報告されている。

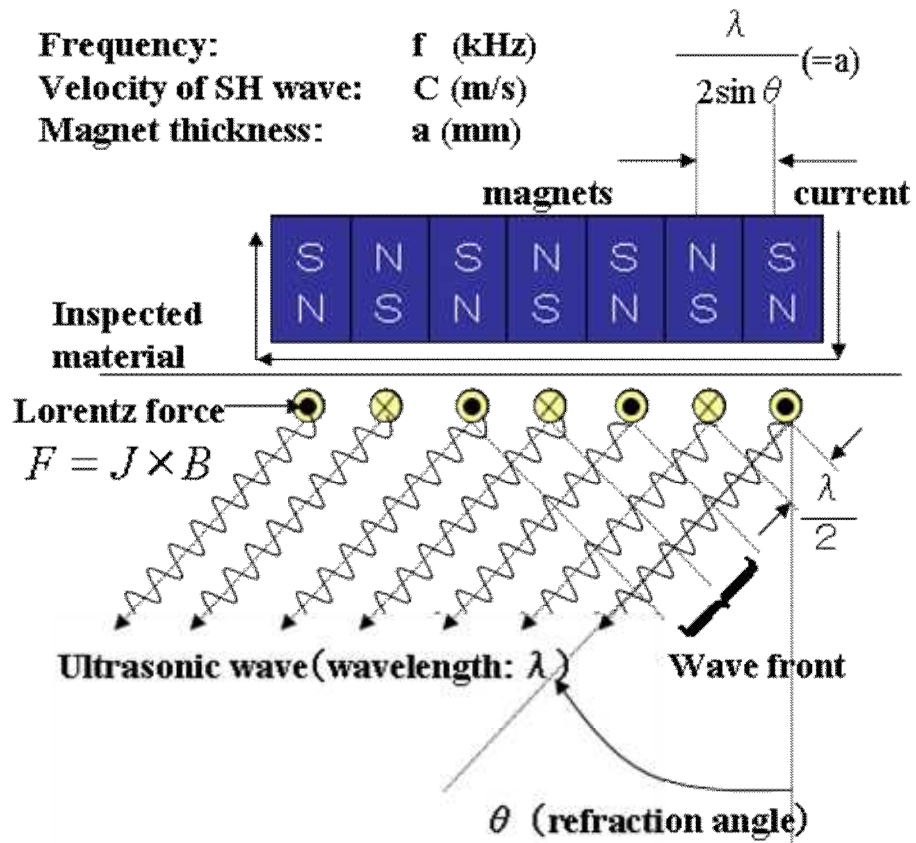


Fig. 2.1.3-1 Periodic-permanent-magnet (PPM) EMAT structure can generate angle beam.

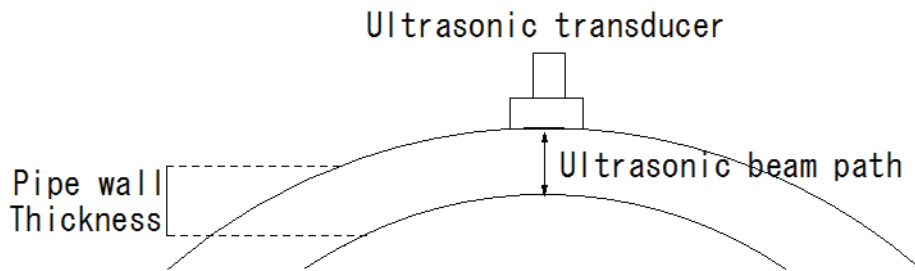


#### 2.1.4 パルスエコー(PE)法

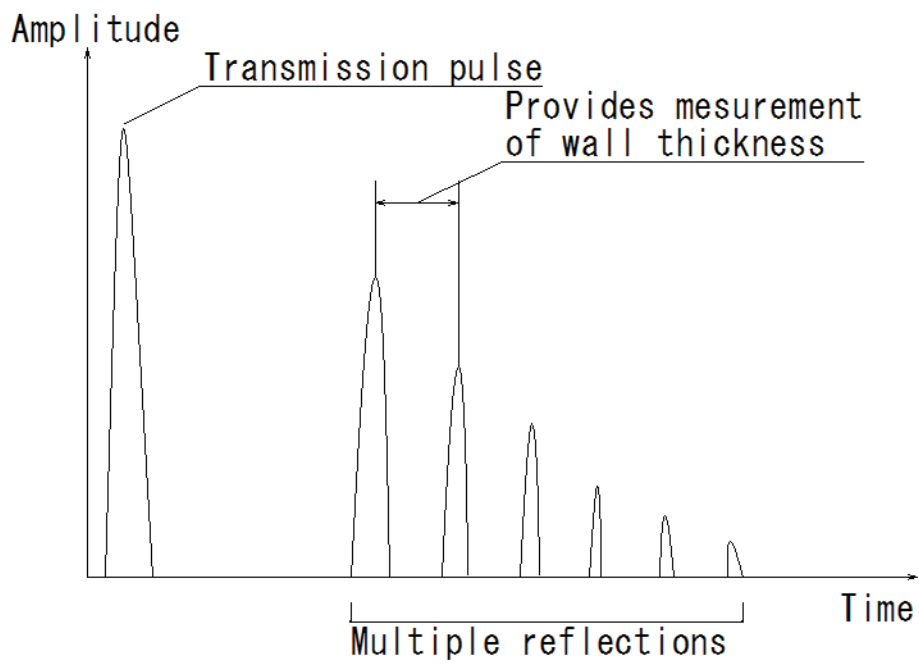
超音波探傷などで一般的に減肉評価に用いられている方法はパルスエコー法と呼ばれる方法である。パルス送信とは、極短い信号をある間隔で繰り返し送信されるもので、送信と送信の間の時間で被検査体からの超音波反射(エコー)を受信する方法がパルスエコー法である。探触子から送信した音は被検査体の反射源に達すると反射し、再び探触子に戻ってくる。被検査体から反射してくる模式図を図 2.1.4-1 に示す。

パルスエコー法を用いた配管減肉の測定原理は、図 2.1.4-2 に示すように送信した超音波が裏面で反射し再び送信した位置で受信する。しかし、超音波は送信面と裏面で反射が繰り返される。これを、多重反射という。超音波強度は被検査体内の伝播距離に応じて減衰するため、繰り返されるごとに受信信号は小さくなるが繰り返し周期は規則正しく行われるため 2 回以上の繰り返し時間間隔を測定することで板厚を測定できる。なお、被検査体の超音波の音速は材質に依存するため事前に音速を測定しておく必要がある。また、1 回の繰り返し反射は材質 1 往復の距離に相当するため、既知の音速を利用することで超音波の伝播距離が計算でき、元々の配管板厚と測定により求めた板厚との差が減肉量となる。それを式で表すと、板厚  $T$ 、超音波音速  $v$ 、受信ピーク時間  $t$  とすると、式 2.1.4-1 の様に表現できる。

$$T = \frac{v(t_{n+1} - t_n)}{2} = \frac{v\Delta t}{2} \quad (2.1.4-1)$$



**Fig.2.1.4-1 Principle of Pulse echo method**



**Fig.2.1.4-2 The ideal pulse-echo waveform attenuated by multiple reflections.**

### 2.1.5 電磁超音波共鳴 (EMAR) 法

電磁超音波共鳴法は平尾や荻らの研究により得られた手法である[H2, O2-O26]。

EMAR 法は、EMAT を用いて金属内の超音波共鳴スペクトルから材料を評価する手法である。この方法は、EMAT の非接触性と超音波共鳴のコヒーレント性がお互いの短所を補い合うことができる[O28]。当初は、薄板の集合組織検出に適用されていた[K2]。その後、極狭い範囲の周波数だけを利用するスーパーヘテロダインによる信号処理や EMAT の高感度化が進み圧電素子に匹敵するほどの感度が得られるようになった[F3]。しかも利点である非接触性は保たれており、被検査体表面の汚れや錆などの影響は受けにくく簡便かつ迅速に測定を行うことができる。また、EMAT での測定は感度は悪いが超音波エネルギーがほとんど奪われないため、圧電素子では測定が極めて困難な超音波減衰などの貴重な情報を容易に得ることができる。

EMAR を用いた減肉量の測定は式 2.1.5-1 を用いて行う。超音波共鳴スペクトルは、送信周波数を挿引しながら、個々の周波数の振幅を検出することによって得られる。板材の場合、 $n$  次の基本共鳴周波数  $f_n$  は、式 2.1.5-1[A4]で表される。

$$f_n = n \left( \frac{v}{2d} \right) \quad (2.1.5-1)$$

ここで、 $d$  は板厚。 $v$  は超音波の音速である。基本共鳴周波数が求めれば板厚が求まる。元々の配管板厚と測定により求めた板厚との差が減肉量となる。

### 2.1.6 熱膨張

高温での試験時には、熱膨張を考慮する必要がある。高温時の板厚は式 2.1.6-1 で表現できる。高温中で正確に板厚の変化を測定することが困難であるため、本研究の高温時の板厚は式 2.1.6-1 を用いて求めた値を用いる。

$$L_{HT} = L_{RT} + \alpha L_{RT} \Delta T . \quad (2.1.6-1)$$

なお、本研究で利用する線熱膨張係数  $\alpha$  は SUS304 が  $\alpha=17.3$  [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ] [I2]、SS400 が  $\alpha=11.8$  [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ] [I2]である。

## 2.2 提案手法

### 2.2.1 パルスエコー共振 (PER) 法

理想的な超音波の多重反射を考えると図 2.2.1-1 のような多重反射が観察される。しかし、この反射波には励磁した周波数成分以外に 2 種類の周波数成分が含まれる。1 つは多重反射を繰り返すことで材料内で共振することにより現れる周波数成分であり、もう 1 つは多重反射が繰り返される繰り返し周波数の成分である。

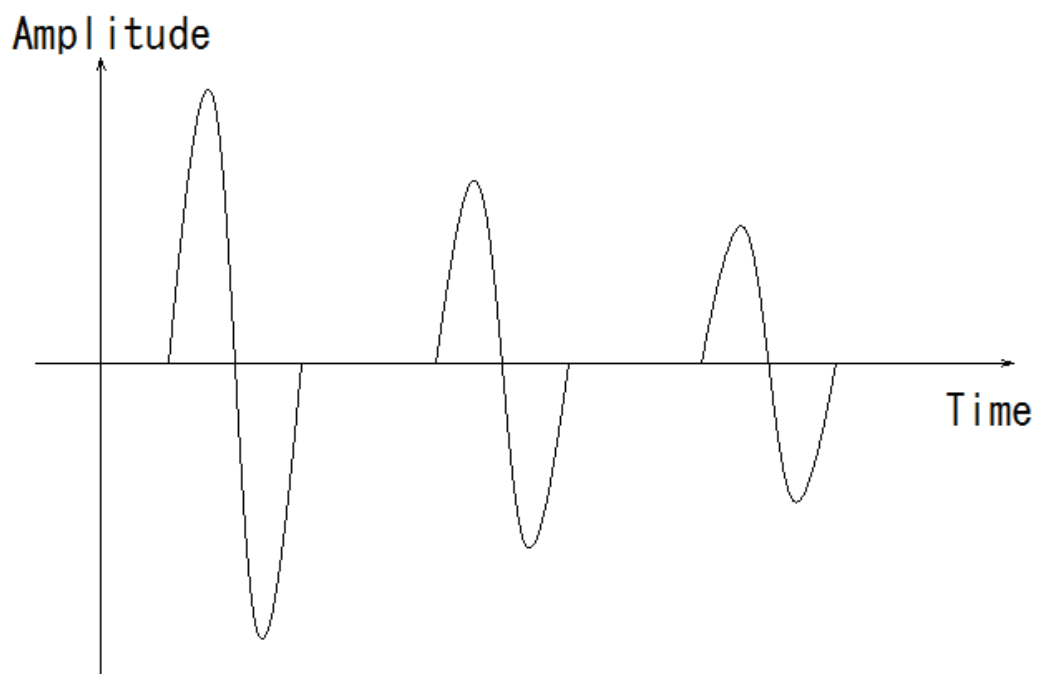
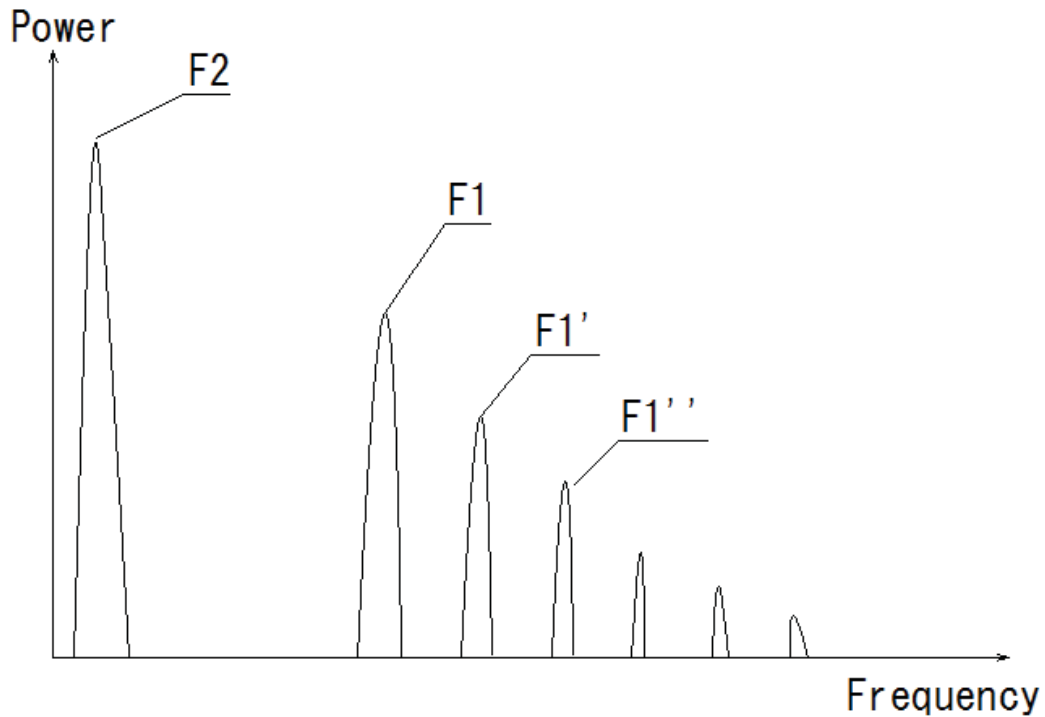


Fig. 2.2.1-1 The ideal waveform image of ultrasonic multiple reflections



**Fig. 2.2.1-2 The ideal FFT form image**

ここで、受信波形を高速フーリエ解析 (FFT) により周波数解析すると図 2.2.1-2 のようになる。F2 は多重反射の繰り返し周波数成分であるが、F1 から F1'' は板厚内で共振する周波数成分である。ここで F1'-F1 を基本波数  $\Delta f$  と考えると板厚 T は式 2.2.1-1 で表されることがわかる。

$$T = \frac{v}{2\Delta f} \quad (2.2.1-1)$$

ここで、v は超音波の音速である。この式 2.2.1-1 は式 2.1.5-1 の  $(n+1)-n$  と同じ形となる。EMAR 法は周波数を掃引することに対し、PER 法は受信波形を FFT するだけでよいため、測定時間がさらに早くなる。また、原理的には EMAR と同様の精度が得られるはずである。周波数掃引のために多数のバースト波を送

信する EMAR 法とは異なり、より少ないバースト波数で十分な受信感度を得て高精度の測定が可能であるかの検証が必要となる。本手法の検証は第 3 章、第 4 章で実施する。

### 2.2.2 ハイブリッドセンシングの概念

原子力発電所のヘルスマモニタリングを行うに際し、センシング技術の高度化は重要な要素である。ここでセンシング技術の向上方法を考えた場合、2 つの考え方がある。1 つはセンサ自体の高度化、高精度化である。高精度で測定できることは、診断精度の向上につながる。もう 1 つは複数の情報を総合的に判断することである。この複数の情報を得るために複数のセンサを多数配置する必要があるが、これは高コストにつながるため事業者としては導入を躊躇する。

そこで、本研究で用いるハイブリッドセンシングの概念を導入する。ハイブリッドセンシングとは、複数の物理量を 1 つのセンサで検出することである[A5]。例えば、光ファイバのブラッグ格子の温度による歪みを利用して温度と応力などの歪を同時に測定する技術である[S1]。温度と歪を同時に計測できることには 2 つのメリットがある。従来は歪計と温度計の 2 種類のセンサの設置が必要であったが、1 つのセンサでよいためコスト削減が図られること。もうひとつは歪と温度の測定が同一箇所であるため位置に依存した誤差がなくなるということである。これは、定性的には精度向上につながる。一方デメリットとしては、1 つのセンサが故障するだけで複数の情報を測定できなくなることである。そのため、ハイブリッドセンシングを行うハイブリッドセンサは構造がシンプルで耐久性に優れ、交換や補修が用意なセンサが良いと考える。本コンセプトは、第 4 章で検証する。

### 2.2.3 相互相関法を用いた水温測定法

原子炉の冷却系配管内の水温測定には、温度計を配管内に挿入する方法や対向配置した圧電素子で発生する超音波を利用して測定することができる。EMATは受信感度が低いため精度よく超音波の受信位置が確認できないために水温測定は困難であると考えられていた。また、炭素鋼などの場合、エロージョン・コロージョンなどにより減肉が発生した場合、超音波が伝達する路程の補正が必要であるため温度測定には減肉測定を行って補正しなければならない。水中の超音波音速は温度(密度)に依存し、伝播する超音波は配管内面からの反射もあるため、内径が小さいほど顕著なピークは現れない。よって、あらかじめ温度のわかった状態で、波形を取得し、得られた波形と取得した波形の相互相関係数を求める [T13]。もしくは、送信波形と受信波形で相互相関係数を求め、相関位置から正確な受信位置を特定することで水温を特定することができる。このとき、データ  $x(n)$  と  $y(n)$  {ともに  $n=0, 1, 2, \dots, N-1$  } の相互相関関数  $R_{xy}$  は式 2.2.3-1 で定義される。

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-k} x(n) \cdot y(n+k) \quad (k=0,1,\dots,N-1) \quad (2.2.3-1)$$

ここで、データ  $y(n)$  は観測される波形であり、データ  $x(n)$  は相関を取るための参照波形である。同式から明らかなように、相互相関関数の値は両波形の相対位置をずらしながら計算した観測波形と参照波形の積和である。相互相関法は、管内の乱反射の中から必要な波形を抽出するのに有効である。本手法は、第 4 章で検証する。



#### 2.2.4 欠陥モニタリング用位置同定法

一般的な斜角超音波センサによる欠陥同定方法を図 2.2.4-1 に示す。ここで、超音波伝播距離は屈折角  $\theta$  と超音波伝搬時間から計算できる。その結果、欠陥位置を式 2.2.4-1 により計算できる。ここで、 $L$  は欠陥までの最短距離、 $\theta$  は屈折、 $C$  は音速、 $t$  は受信時間である。

$$L = \frac{Ct}{2} \sin \theta \quad (2.2.4-1)$$

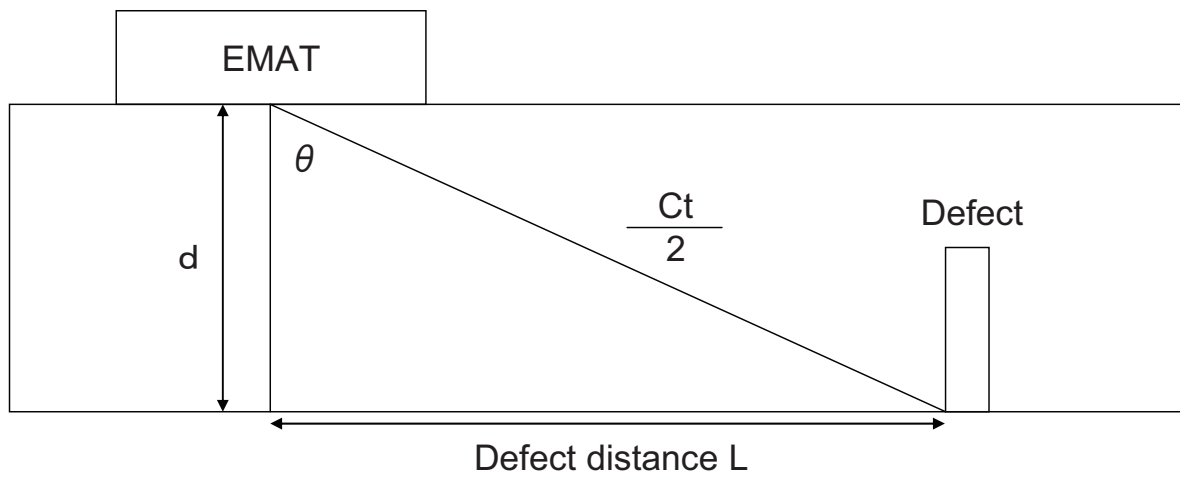
ここで、EMAT の屈折角は式 2.1.3-1 を用いて計算することができる。しかし、この屈折角を用いて欠陥同定を行っても正確な位置同定ができないことが確認された。

そこで、本研究では次の仮説を立て、その検証を行った。従来研究の斜角 EMAT は超音波音圧が焦点を結び機械スキャンすることで欠陥同定を行ってきた[R3] が、本研究の欠陥モニタリング用ダブルコイル型 EMAT は超音波音圧が焦点を結ばないために広い周波数帯域で超音波が送信される[X1]ことから、広帯域の超音波が欠陥に対し照射されていると考える。送信された超音波は、欠陥で反射して受信される。このとき従来手法のように超音波が焦点を結び機械スキャンを行う場合、最も反射強度が高くなるのは式 2.1.3-1 で求まる屈折角の位置であるが、焦点を持たず定点固定して使用する場合は広帯域の中からセンサと欠陥を最短距離で結ぶ位置に相当する屈折角に相当する周波数成分が最も反射強度が強いと考える。これは、図 2.2.4-2 に示すように、センサと欠陥位置を変化させた場合、受信される超音波の周波数成分が変化することが FFT により確認されることから仮説を検証する必要があると考える。そこで、受信波形の FFT 解析を行い、最大周波数を  $f'$  として式 2.2.4-2 に代入して欠陥同定を行う。 $\theta'$  は受信した周波数から求まる屈折角である。この時の超音波路程  $L$  は式 2.2.4.3 で計算できる。

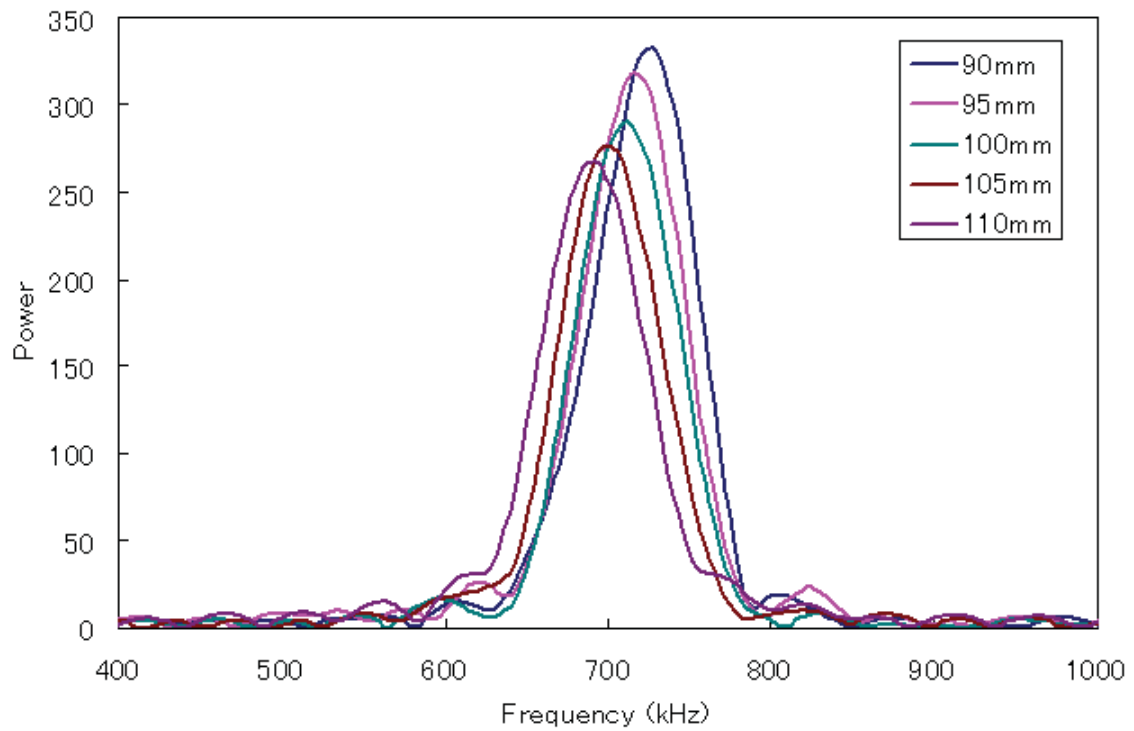
$$f' = \frac{C}{2a \sin \theta} \quad (2.2.4-2)$$

$$L = \frac{Ct}{2} \sin \theta' \quad (2.2.4-3)$$

本手法は、第 5 章で検証する。



**Fig. 2.2.4-1 Relationship between EMAT position and defective distance. A trigonometric function can express.**



**Fig. 2.2.4-2** The FFT results of the received wave when transmitting a ultrasonic wave with the excitation frequency of 700kHz, and changing defective distance up to 90mm - 110 mm. In spite of not having changed excitation frequency, such strongest frequency component is shifted to the higher one that defective distance becomes near. Excitation frequency, it was the same tendency even if changed into 650kHz and 750kHz.

## 第3章

### 配管減肉モニタリング用センサの研究

#### 3.1 緒言

配管減肉モニタリングのハイブリッドセンシングを行う前提条件として、EMATを用いて高精度なモニタリングができなければならない。課題は、高温環境でも高精度で使用することができることと、最大18ヶ月の連続運転に耐えうる耐久性を備えることである。また、ひとつの発電所で数千箇所の設置が必要であることから、実質的に可能なコストでセンサ製作ができることを視野に入れた研究が必要である。EMAT研究は様々行われており[T1-T8、M4、M5]高温環境下での利用も確認されている。筆者らも高速増殖炉「もんじゅ」用体積検査装置としてEMATの開発[X1、A3]を行っているが、いずれも減肉モニタリング用ではない。配管減肉モニタリングに必要な条件について、実例を挙げて考える。関西電力株式会社美浜発電所3号機二次系配管破損事故の際に事業者が測定したデータ[N5]によれば、配管肉厚は、加圧型軽水炉(PWR)二次系において適用される「発電用火力設備に関する技術基準を定める省令」に基づく、蒸気タービンに付属する管の耐圧強度基準では4.7mm以上必要であるところ、最も薄いところで0.4mmであった。また、減肉は配管の上部で著しかった。また既存研究における減肉検査用EMATの検出精度は $4 \pm 0.3\text{mm}$ であった[J5]。配管減肉モニタリングを実施するには、少なくとも耐圧強度基準の4.7mm以下の測定を余裕を持って測定でき、0.1mm以上の精度が要求されると考える。

## 3.2 EMAT の試作

### 3.2.1 開発目標

開発目標は、PWR 二次系において適用される「発電用火力設備に関する技術基準を定める省令」に基づく、蒸気タービンに付属する管の耐圧強度基準である 4.7mm を精度良くモニタリングできることを対象とし、従来研究の検出限界である  $4 \pm 0.3\text{mm}$  以上の検出精度が得られることを考慮する。具体的には、耐圧強度基準の 2 倍以上の余裕となる 2mm の板厚測定と 0.1mm 以下の測定精度を開発目標とする。性能試験項目は、室温試験、高温試験、耐久試験を行う。試験片材質は常磁性体の SUS304 と強磁性体の SS400 を用いるが、高温試験、耐久試験についてはセンサの成立性を確認するために試験片の酸化の影響を考慮する必要がない SUS304 のみを利用する。耐久時間については 3.4.3 耐久試験で述べる。開発目標を表 3.2.1-1 にまとめる。また、各々の試験片をマイクロメータで測定した評価基準となる板厚測定結果を表 3.2.1-2 に示す。

**Table 3.2.1-1 Development targets**

Max. temp. (°C)	Durability (hr)	Limit of measurement (mm)	Accuracy (mm)	Specimen size (mm)	Material
200	13000	$\leq 2$	$\leq \pm 0.1$	70W×100L ×2, 5, 10, 15T	SS400 SUS304

**Table 3.2.1-2 Specimen thickness measurements**

Official thickness (mm)	Real thickness using a micrometer	
	SS400	SUS304
2	2.00	2.00
5	5.02	4.95
10	10.00	9.95
15	14.95	14.85

### 3.2.2 永久磁石材料の選択

EMAT を高精度にするには、送受信感度を向上させる必要がある。そのためには、高温でも高い磁束密度を維持できる磁石を選定することが重要である。

一般的に高い磁束密度を有する磁石は、ネオジム(Nd)磁石である。また、高温でも比較的高い磁束密度を保持できるサマリウムコバルト(SmCo)磁石がある。

そこで、Nd 磁石(信越化学社製 N42SH、N30EZ)と SmCo 磁石(信越化学社製 R32H)の高温での保磁力  $iH_c$  と残留磁束密度  $B_r$  を比較した。比較した結果を図 3.2.2-1 と 3.2.2-2 に示す。保持力、残留磁束密度ともに約  $180^{\circ}\text{C}$  で Nd 磁石と SmCo 磁石の強度は逆転する。モニタリング温度は  $200^{\circ}\text{C}$  以上であることを考えると SmCo 磁石が有利であることがわかる。そこで、SmCo 磁石(R32H、R26HS)の  $240^{\circ}\text{C}$  までの高温消磁曲線を図 3.2.2-3 に示す。この図より、SmCo 磁石であれば  $200^{\circ}\text{C}$  でも十分利用できることがわかった。

よって、本研究で用いる磁石は、SmCo 磁石を選定した。

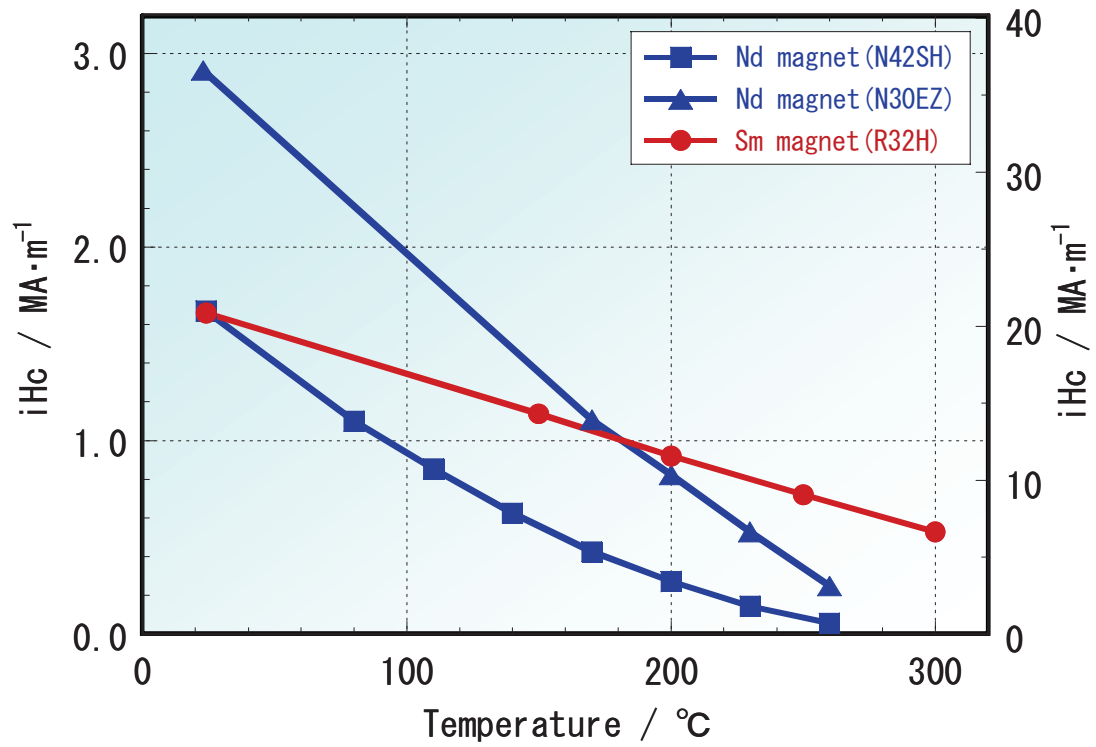


Figure 3.2.2-1 Temperature dependency of Nd magnet and SmCo magnet where  $iH_c$  represents the magnetic field strength. The field intensity of SmCo magnet is stronger than that of Nd magnet for temperatures higher than 180 degrees C.

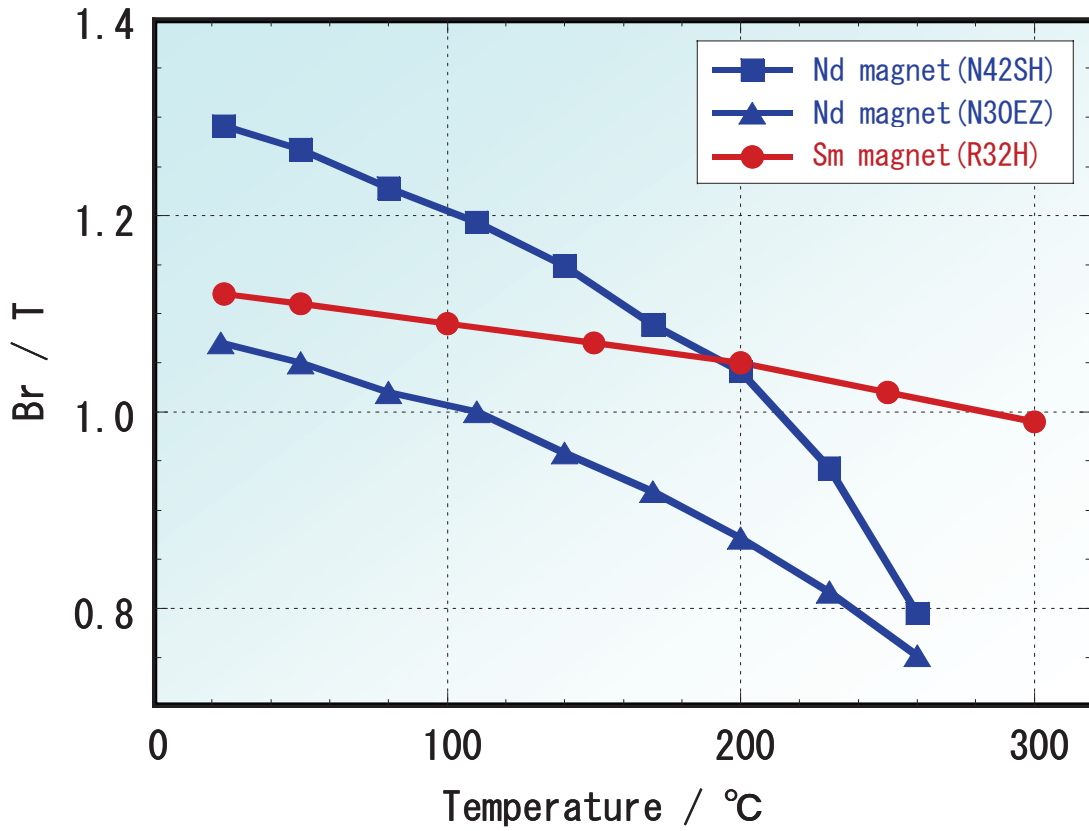
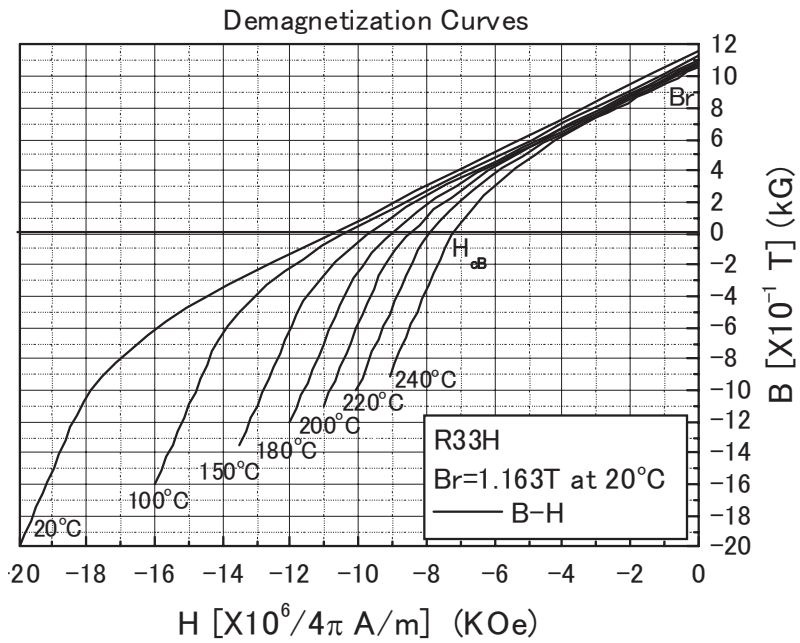
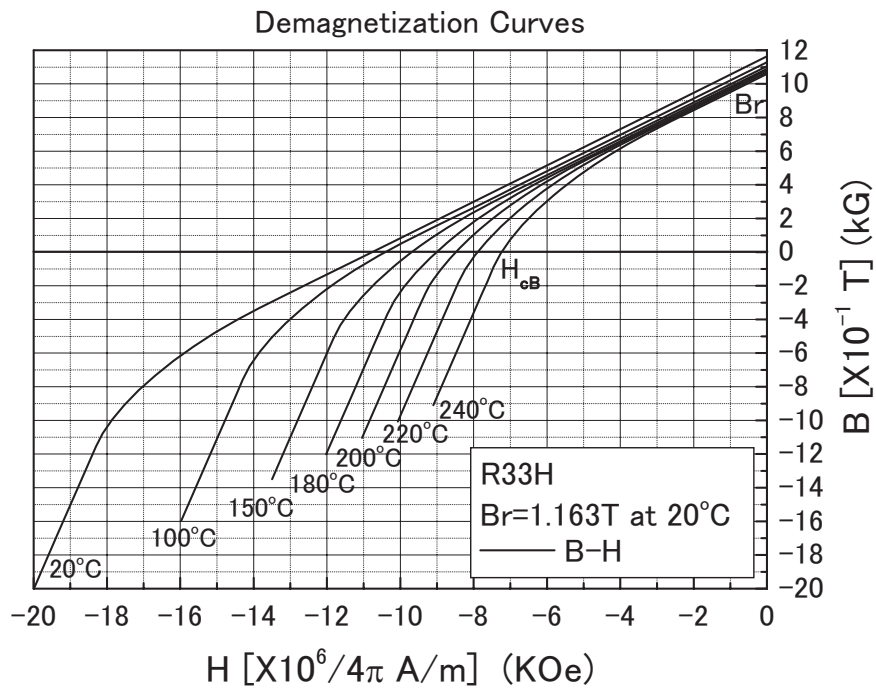


Figure 3.2.2-2 Temperature dependency of Nd magnet and SmCo magnet where Br is the remanent magnetic flux density. Br is stronger for the SmCo magnet than for the Nd magnet for temperatures above 200 degrees C.





(a)



(b)

Figure 3.2.2-3 The demagnetization curves for R32H (a) and R26HS (b) permanent magnets [S3, T10\*].

### 3.2.3 試作

SmCo 磁石と渦巻きコイルを用いて配管減肉モニタリング用 EMAT を試作した。コイルは、 $\phi 0.2\text{mm} \times 60$  巻きとしバースト波発生装置とのインピーダンスマッチングを行った。図 3.2.3-1 は試作した EMAT の構造図であり、図 3.2.3-2 は試作した EMAT の写真である。

設計に際し、耐久性が高く安価であることを視野に入れるため、センサ構成部品を少なくし、高温環境下で問題となりそうな接着やハンダ点数は必要最小限に留めるシンプルな設計を心がけた。

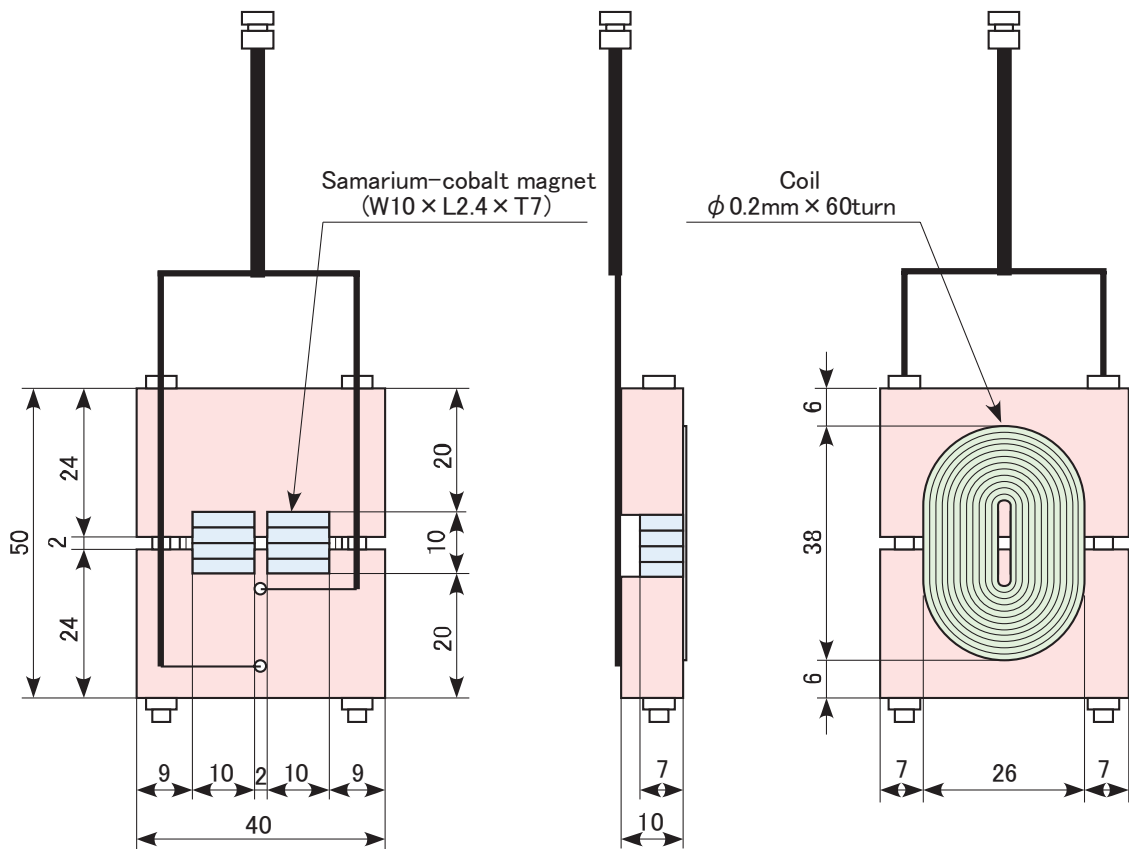
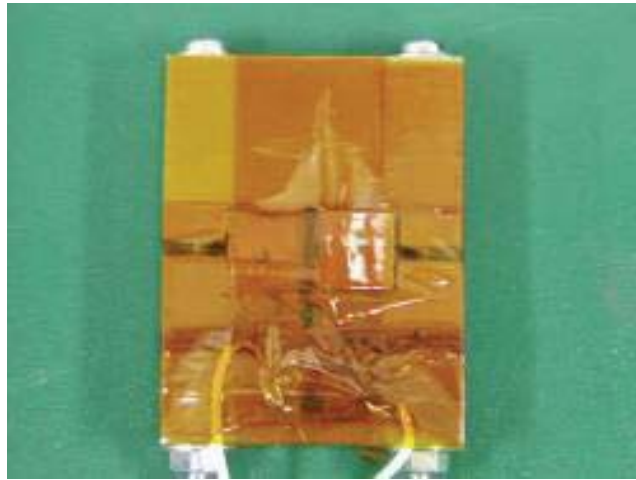
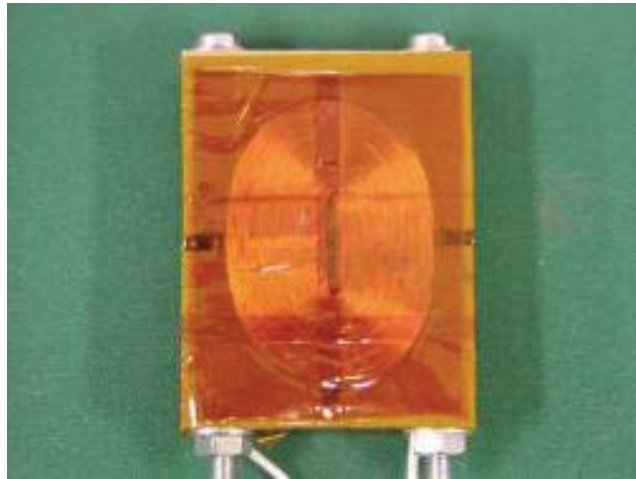


Figure 3.2.3-1 Schematics of the sensor structure of the trial EMAT [T10\*].



(a)



(b)

**Figure 3.2.3-2 Photograph of trial EMAT:  
a) upper side view-magnet; b) downside view-coil [T10\*].**

### 3.3 試験方法

#### 3.3.1 測定システム

各試験で共通して利用する測定システムを図 3.3.1-1 に示す。システムの構成は、超音波であるバースト波を発生する装置、プリアンプ、送受信信号を分配するデュプレクサ、超音波波形を表示するオシロスコープ、超音波波形を受信し信号処理を行う計算機(PC)で構成される。高温試験、耐久試験時は恒温槽を利用する。なお、超音波を発生させる際のバースト波発生装置の設定を表 3.3.1-1 に示す。

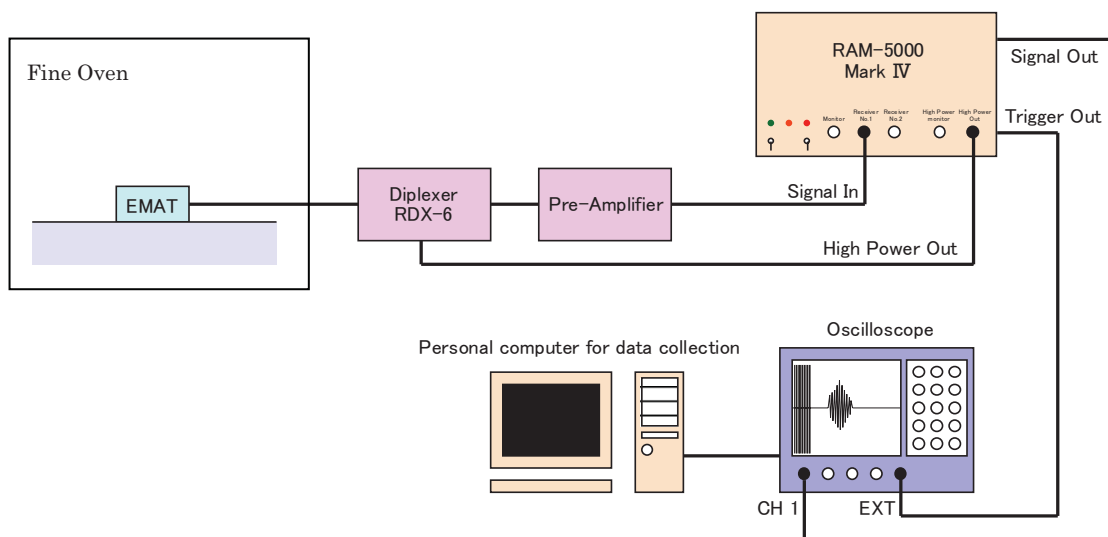
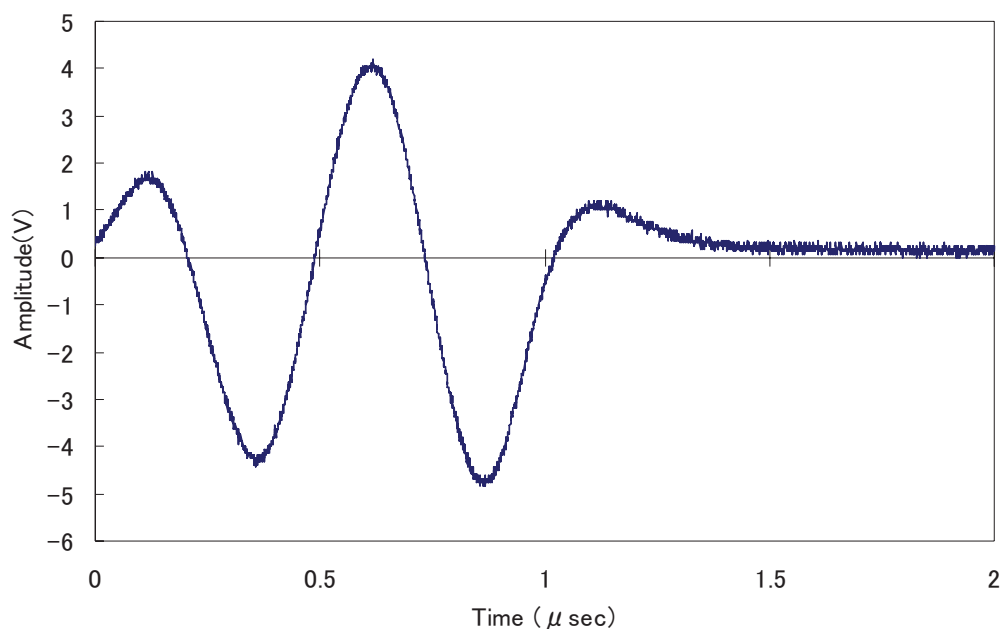


Figure 3.3.1-1 Diagram of the EMAT measuring system [T10\*].

**Table 3.3.1-1 Characteristics of EMAT transmission wave [T10\*].**

Frequency	2 MHz	Watts RMS	6400 W
Cycles per burst	2 cycles	HP Filter	1 MHz
Control	100	LP Filter	5 MHz
RF Level	3.14 V	Receiver Gain	34 dB
Bias	4.99 V	Pre-Amplifier Gain	40 dB
P-P Volts	1600 V	Sampling rate	25 MS/sec

図 3.3.1-2 は、バースト波数を 2 波、励磁周波数を 2MHz とした際の送信波形である。バースト波数が多いほど超音波のエネルギーは大きくなるが、不感帯も大きくなるため板厚の薄い配管を観察する場合にはなるべく少ない波数で観察する方がよい。励磁周波数は、200kHz から 10MHz まで励磁周波数を変化させ、受信波強度を測定する予備試験を行った結果、最も受信強度の強かった 2MHz を選定している。



**Figure 3.3.1-2 Waveform of transmitted burst wave (2MHz) [T10\*]**

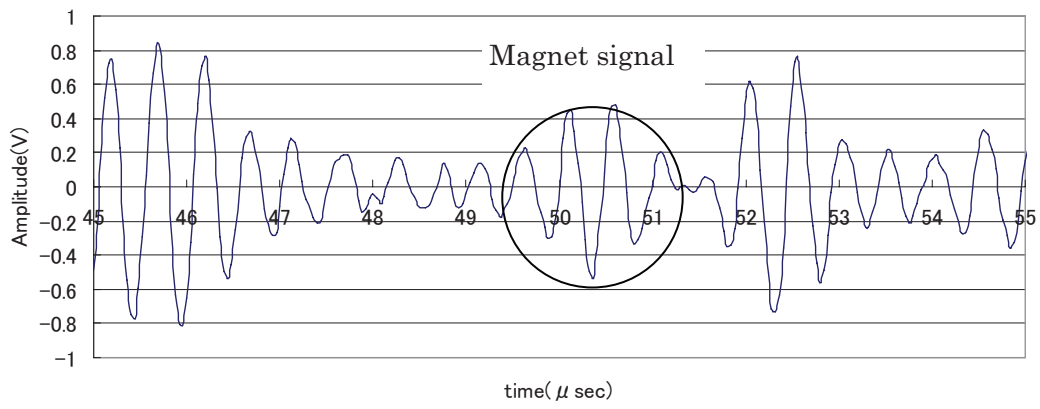
### 3.3.2 高温時の磁石ノイズフィルタ

高温試験を行うに際し、予備試験を行ったところ、高温では磁石内で超音波が反射してくる信号がノイズとして受信されることがわかった。これは、試験片厚さが変化することに対し、磁石厚さは一定であるため磁石信号は定位置に現れた(図 3.3.2-1)こと、また試験片から離れた状態でも多重反射信号が検出されたことから判明した。磁石からの信号の周波数解析を行ったところ試験片とは異なる周波数で共振することがわかったため、磁石内で発生する共振周波数成分を除去するノイズフィルタを高温試験では用いることとした。ノイズフィルタを用いたあとの信号を図 3.3.2-2 に示す。

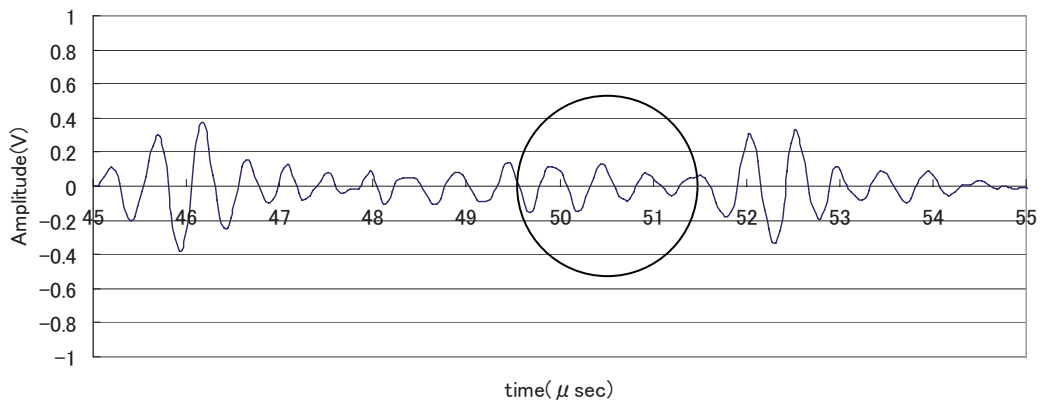
なお、試験片から離れた状態で高さ 7mm の磁石からの信号を用いて 200°Cまでの磁石内音速を測定したところ、式 3.3.2-1 の関係があることがわかった。

$$v = -0.173Te + 2578.96 \quad (3.3.2-1)$$

ここで、 $v$  (m/sec) は磁石内の超音波音速、 $Te$  (°C) は温度である。室温 (20°C) では 2575.5 (m/sec) を用い、高温 (200°C) では、2544.4 (m/sec) を用いた。



**Fig.3.3.2-1 EMAT signal including the magnet signal**



**Fig.3.3.2-2 EMAT signal without magnet signal after filtering**

## 3.4 試験結果

### 3.4.1 室温試験

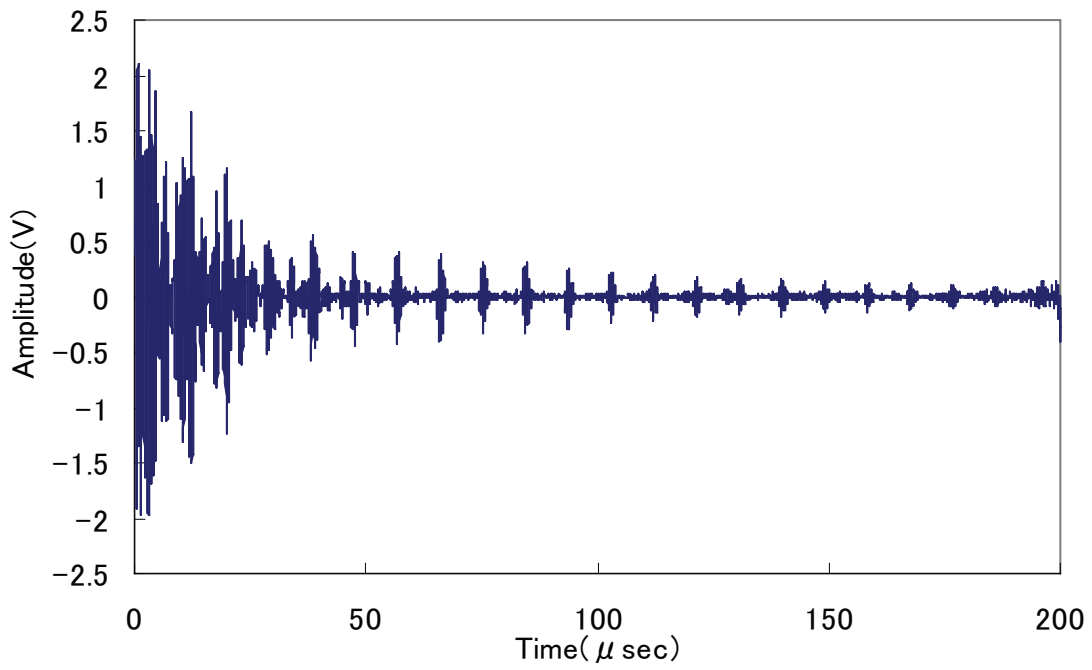
図 3.4.1-1 から 3.4.1-4 は、板厚 15、10、5、2mm の SS400 を測定した受信波形。図 3.4.1-5 から 3.4.1-8 は、板厚 15、10、5、2mm の SUS304 を測定した受信波形である。それぞれ、温度は常温で、上図が PE 法で測定したもの、下図が PE 法で得た波形を FFT 解析した波形であり、PER 法に用いる。板厚評価に用いる超音波の音速は、SS400 が 3230 (m/s)、SUS304 が 3120 (m/s) [M7] である。これらの測定結果を板厚評価し、まとめた表が表 3.4.1-1 と表 3.4.1-2 である。表 3.4.1-1 は、SS400 の測定結果。表 3.4.1-2 は、SUS304 の測定結果である。PE 法の場合、式 2.1.4-1 を用いて板厚を評価する。PER 法の場合、式 2.2.1-1 を用いて板厚を評価する。表 3.4.1-1 と 3.4.1-2 より PE 法を用いて 2mm 以下の板厚を測定することは困難である。それは、多重反射によって得られる受信波の分解能が薄いほど悪くなるためである。一方 PER 法では、2mm の板厚でも 0.01mm の精度で測定可能であった。それぞれの FFT 解析結果を観察すると、板厚が薄いほど周波数差が大きくなるため波形の分解能がよくなる。逆に言えば、板厚が厚いほど周波数差が小さくなり波形の分解能は悪くなるということである。

よって、板厚が厚い場合は PE 法、薄い場合は PER 法で測定すれば高い精度で測定することが可能である。式 3.4.1-1 で表される周波数差  $\Delta f$  と板厚の関係について理論式と測定結果を比較したものが図 3.4.1-9 と 3.4.1-10 である。

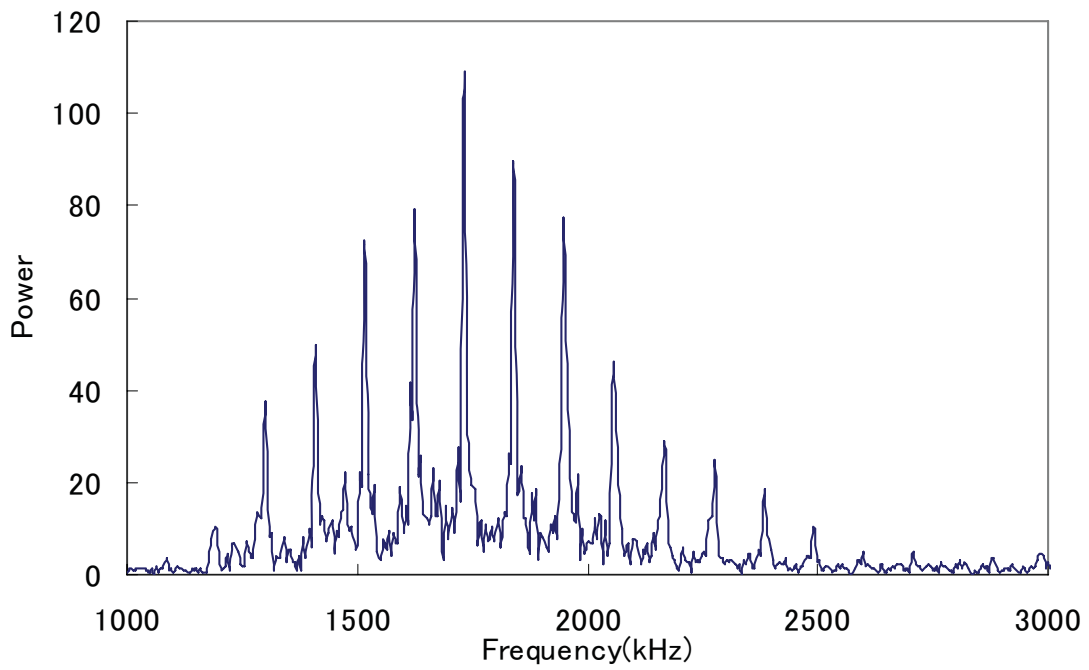
$$\Delta f_n = \frac{(n+1)v}{2T} - \frac{nv}{2T} = \frac{v}{2T} \quad (3.4.1-1)$$

図より、理論式とよく合うことが確認できた。よって、常温では PER 法を用いることで  $2\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$  の精度で測定することができることを確認した。PE 法では従来研究と同程度の板厚 4mm までしか測定できなかったが、測定精度は  $\pm 0.04\text{mm}$  以内であり、従来研究よりも一桁ほどよいことが確認できた。



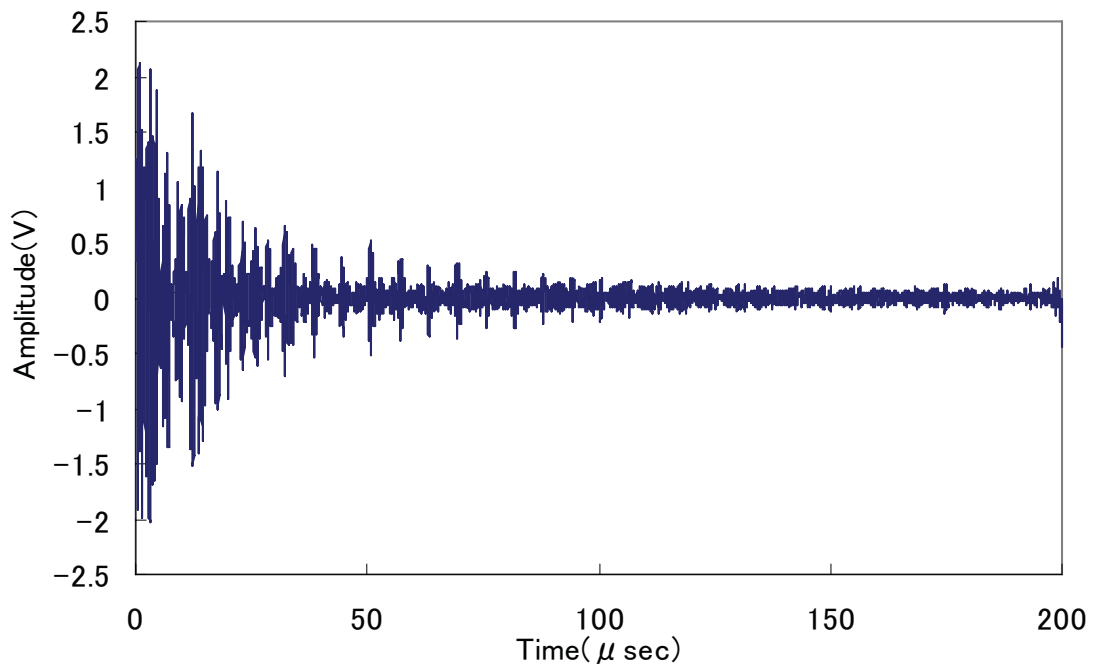


a)

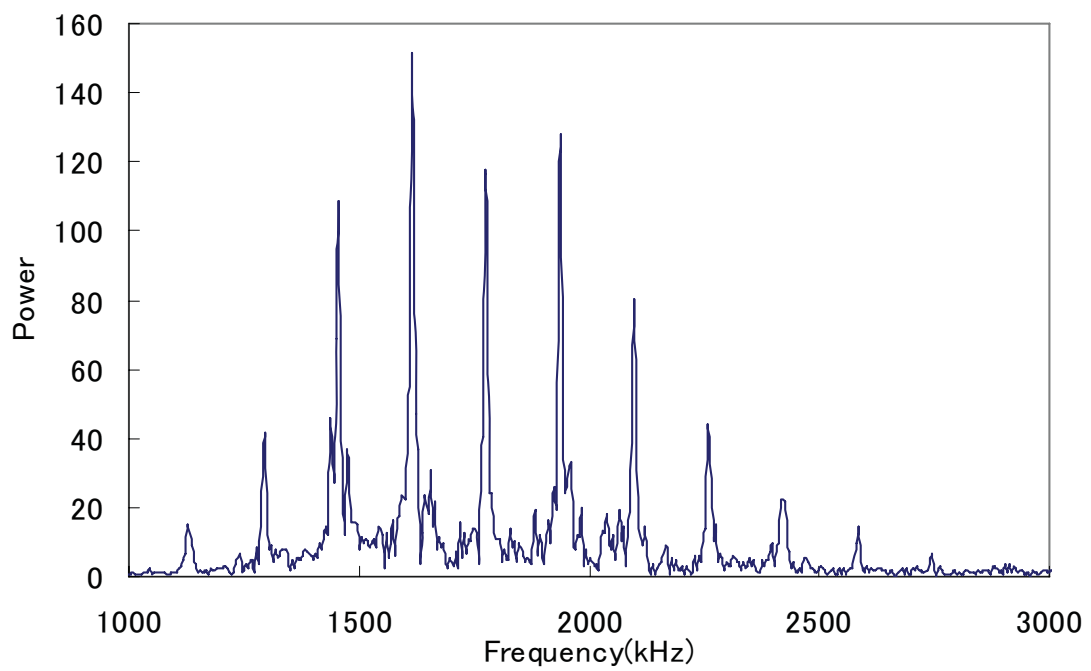


b)

**Figure 3.4.1-1 15mmT waveform of SS400: a) PE method; b) PER method [T10\*]**

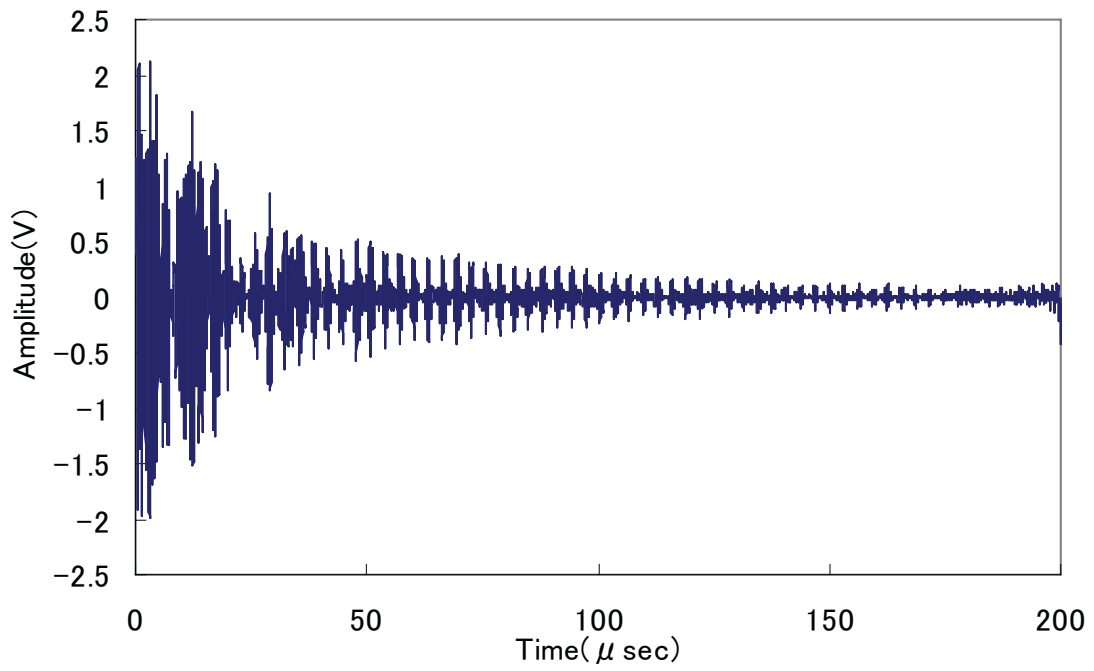


a)

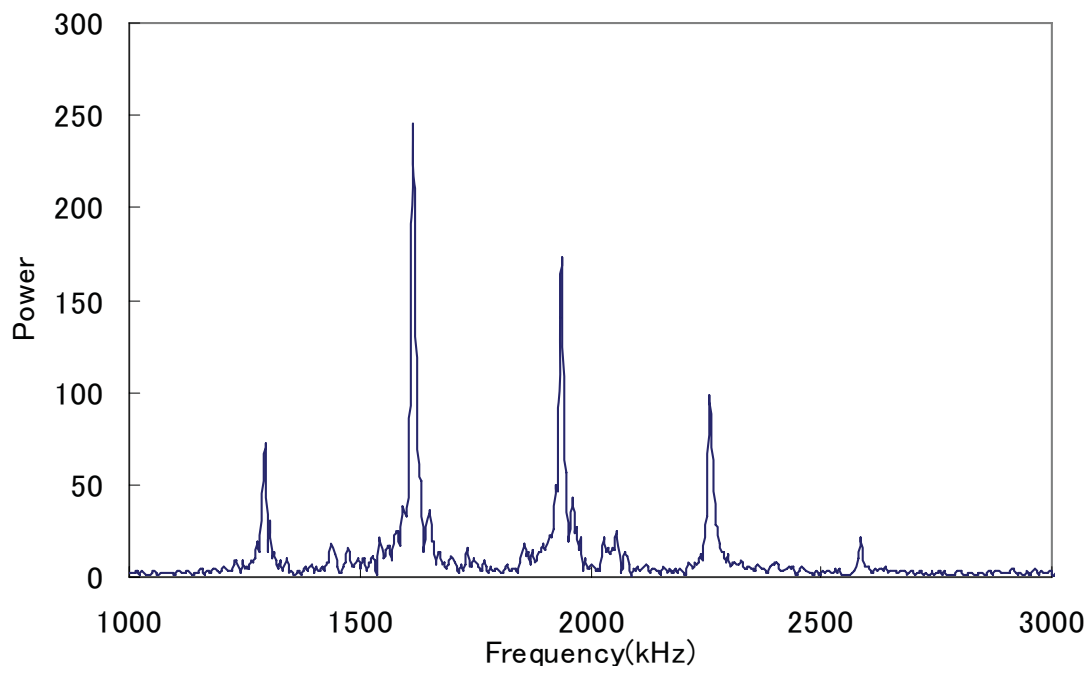


b)

**Figure 3.4.1-2 10mmT waveform of SS400: a) PE method; b) PER method [T10\*]**

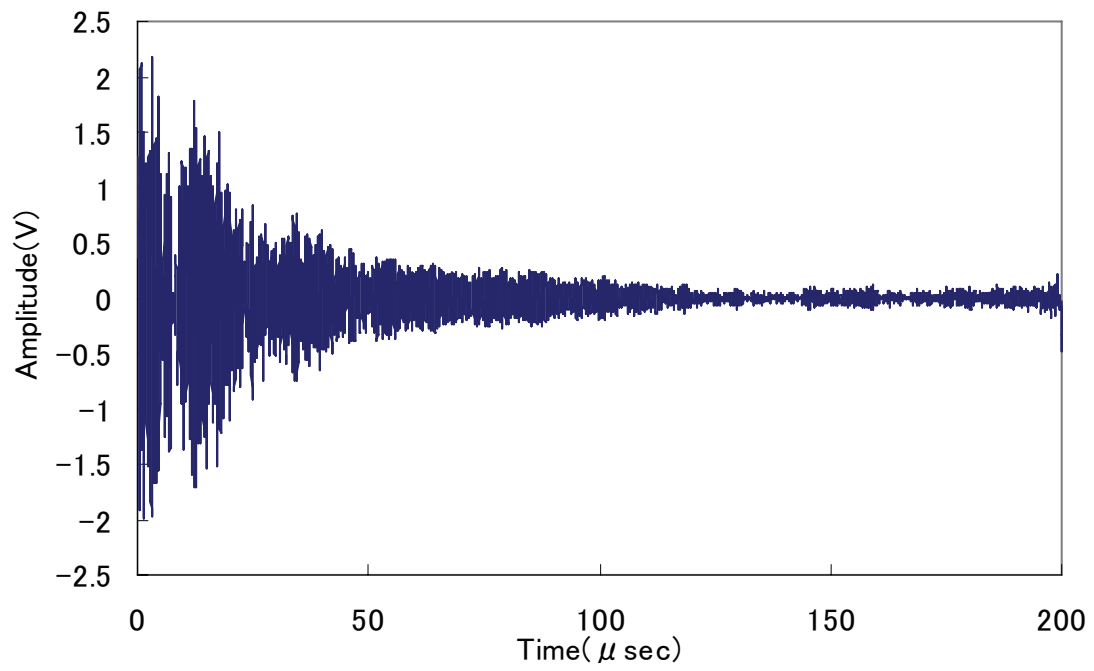


a)

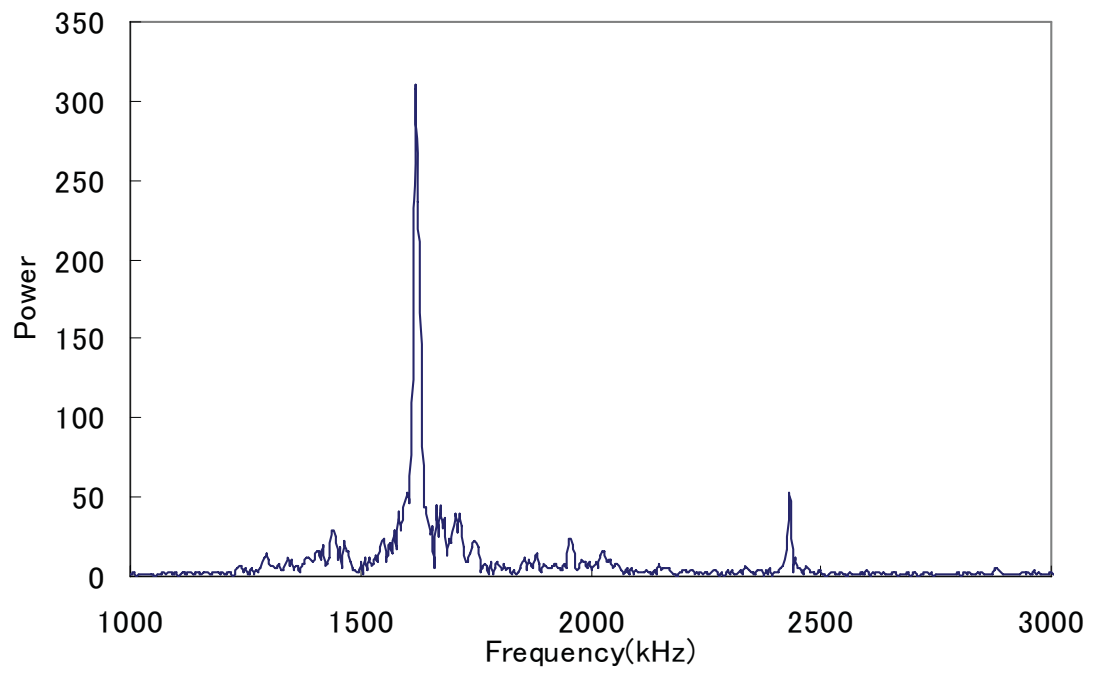


b)

**Figure 3.4.1-3 5mmT waveform of SS400: a) PE method; b) PER method [T10\*]**

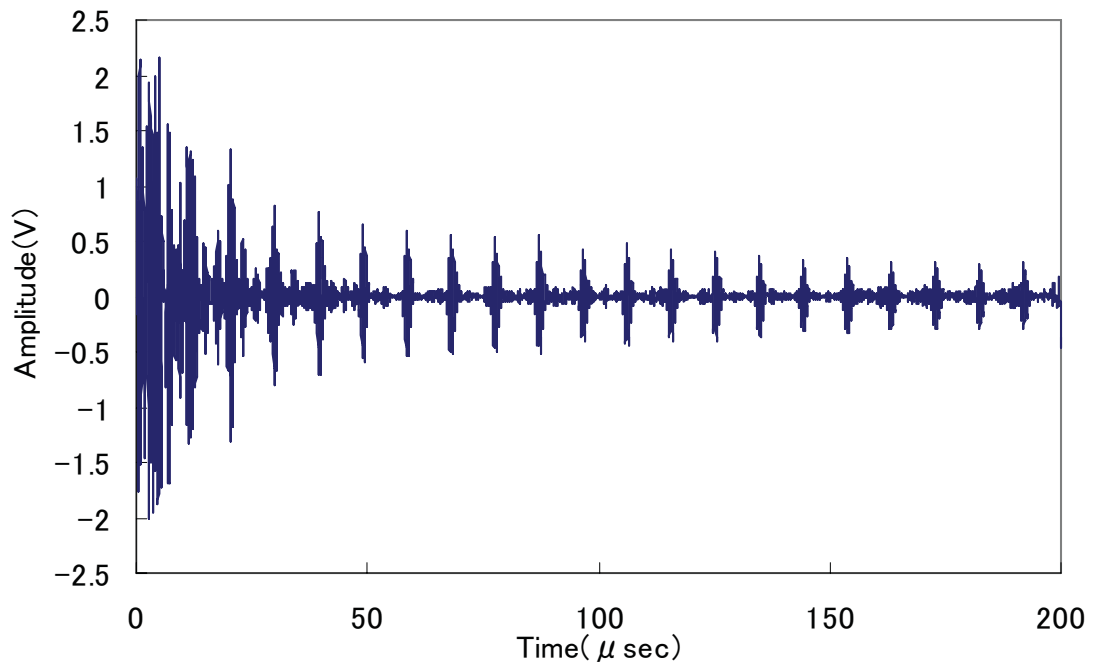


a)

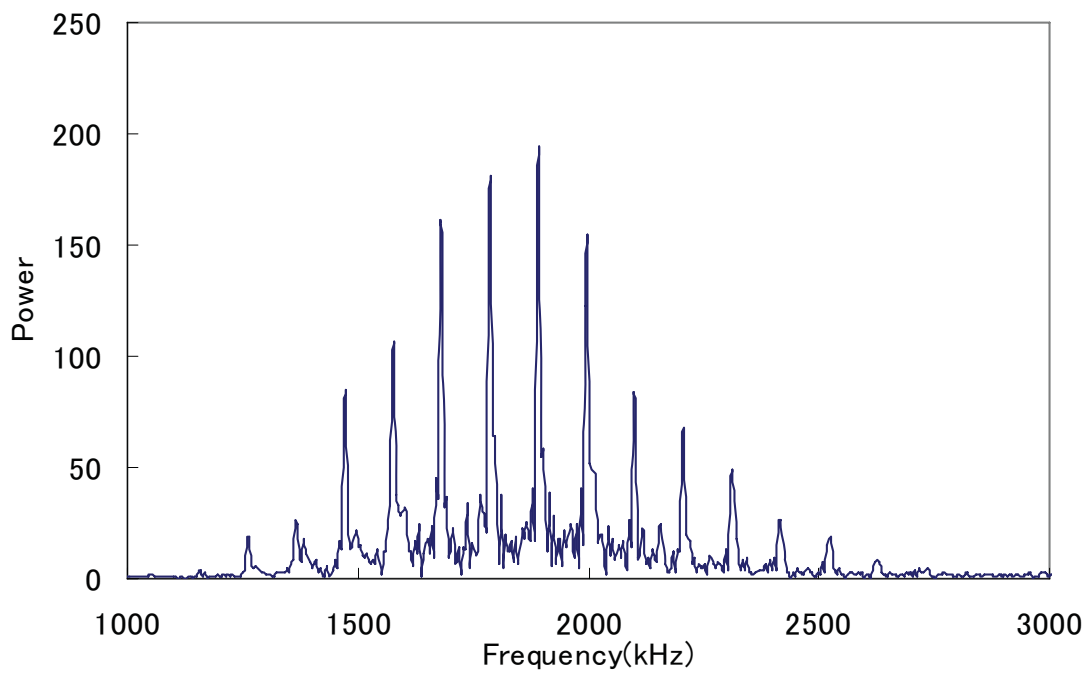


b)

**Figure 3.4.1-4 2mmT waveform of SS400: a) PE method; b) PER method [T10\*]**

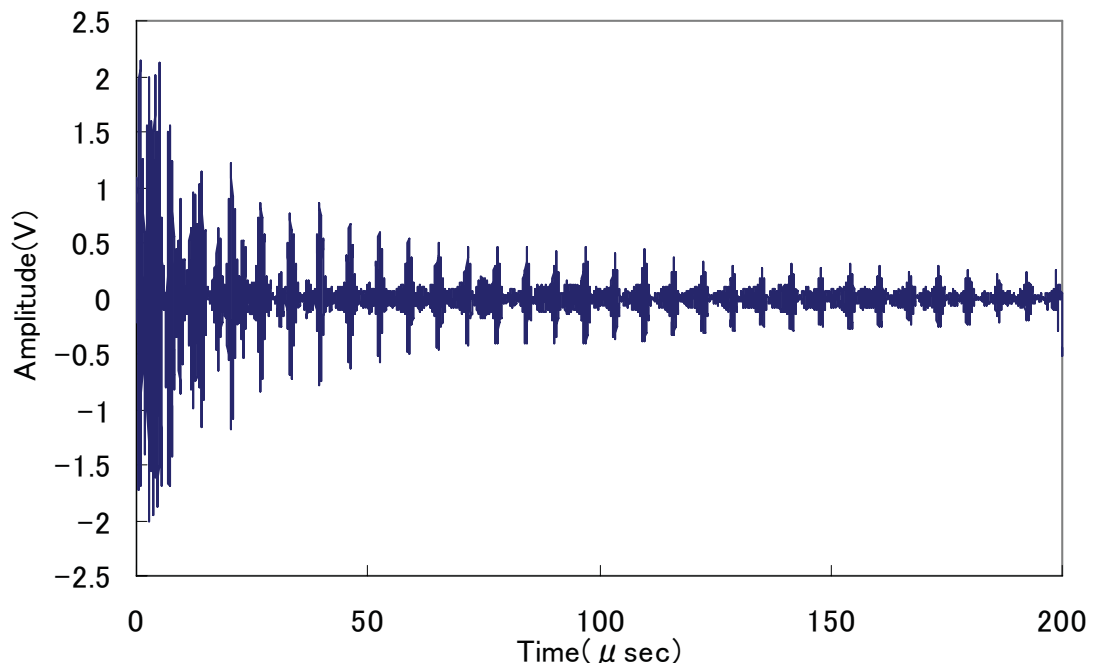


a)

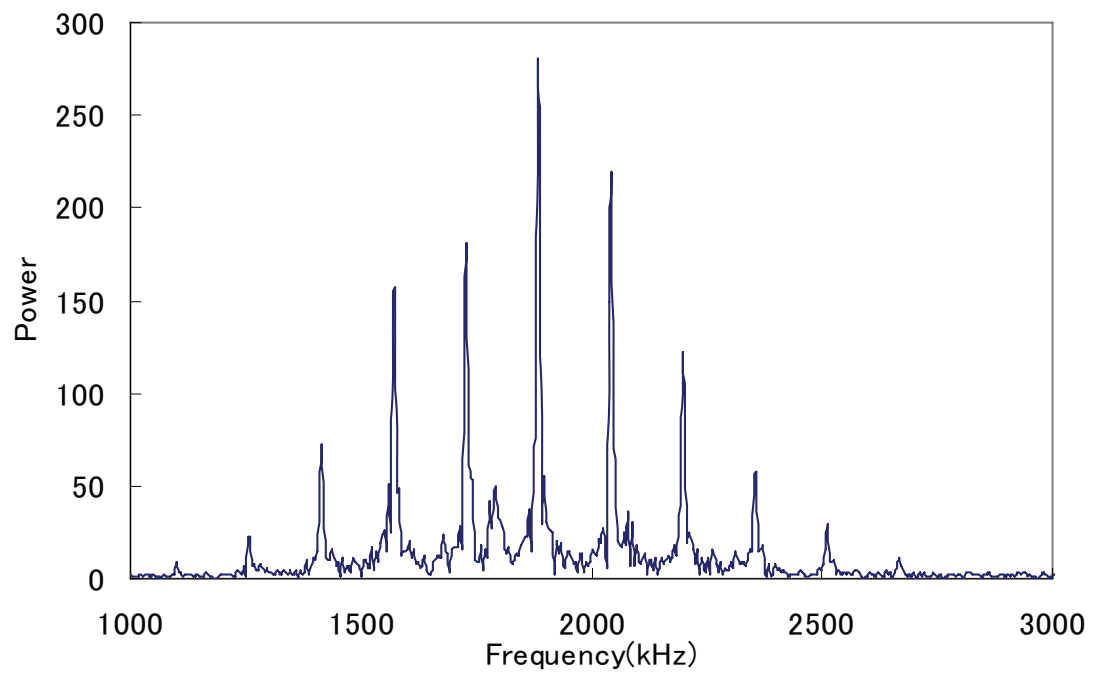


b)

**Figure 3.4.1-5 15mmT waveform of SUS400: a) PE method; b) PER method**

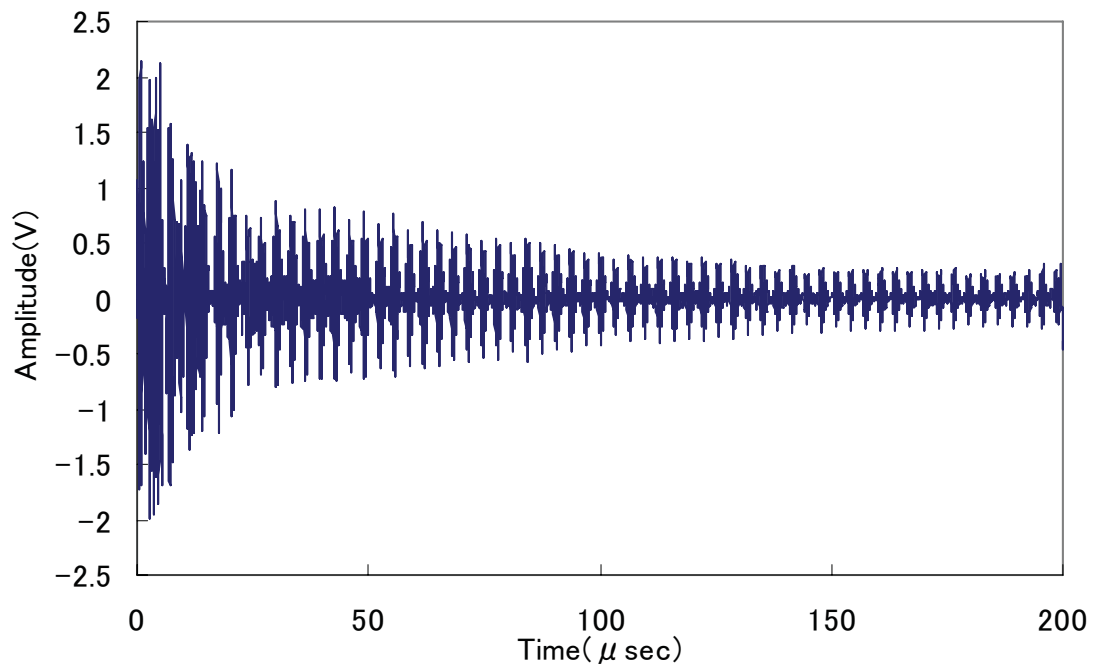


a)

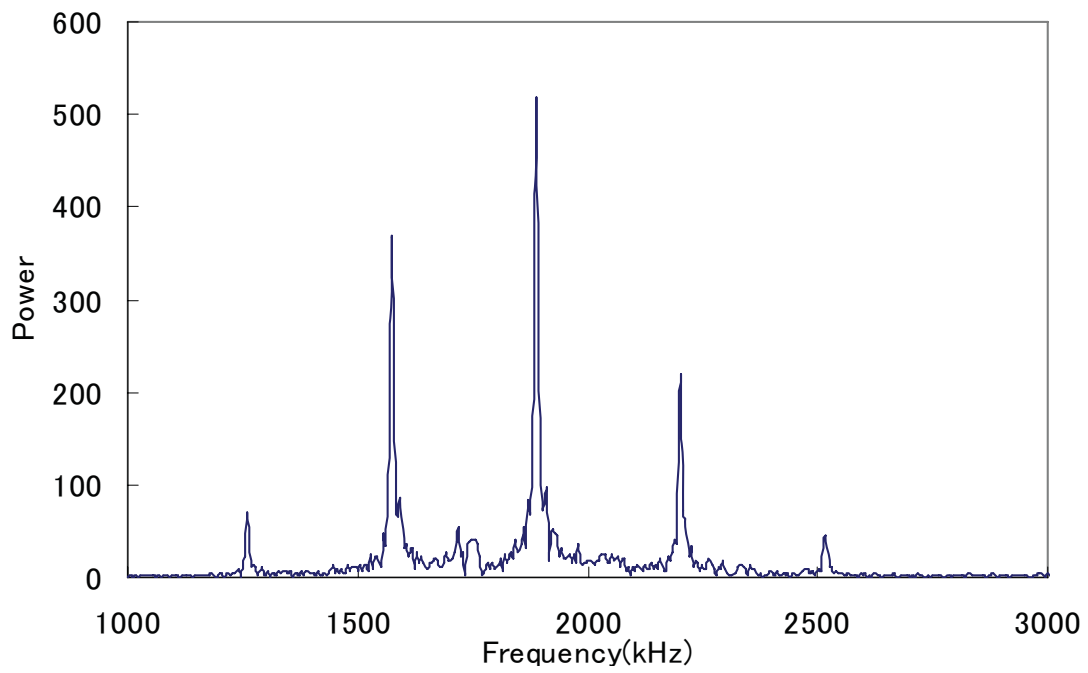


b)

**Figure 3.4.1-6 10mmT waveform of SUS400: a) PE method; b) PER method**

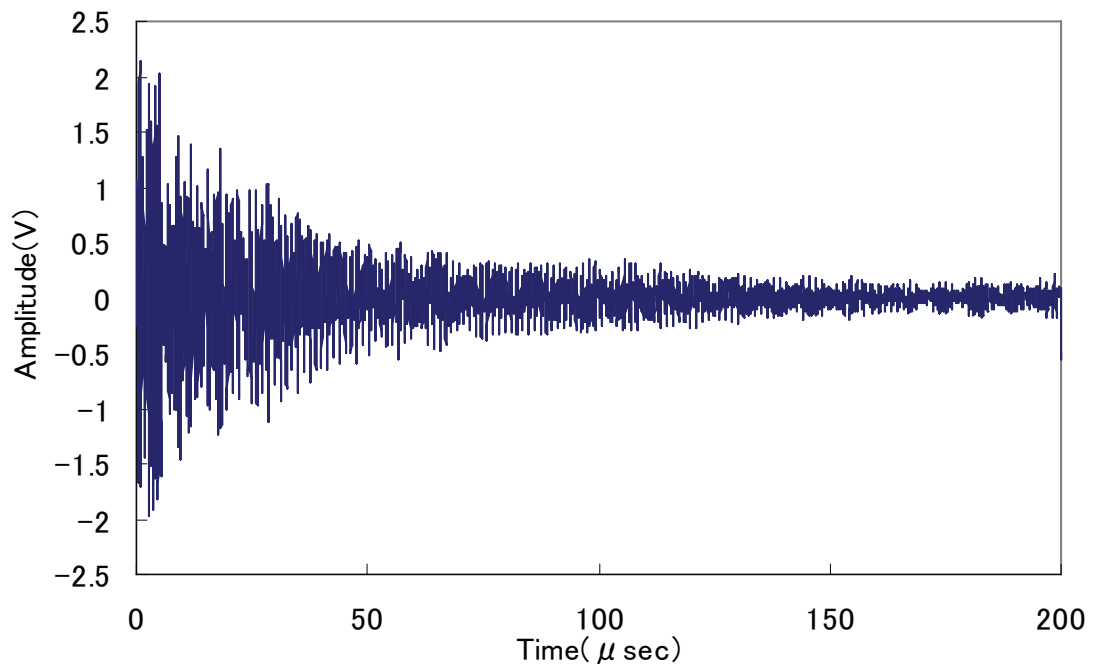


a)

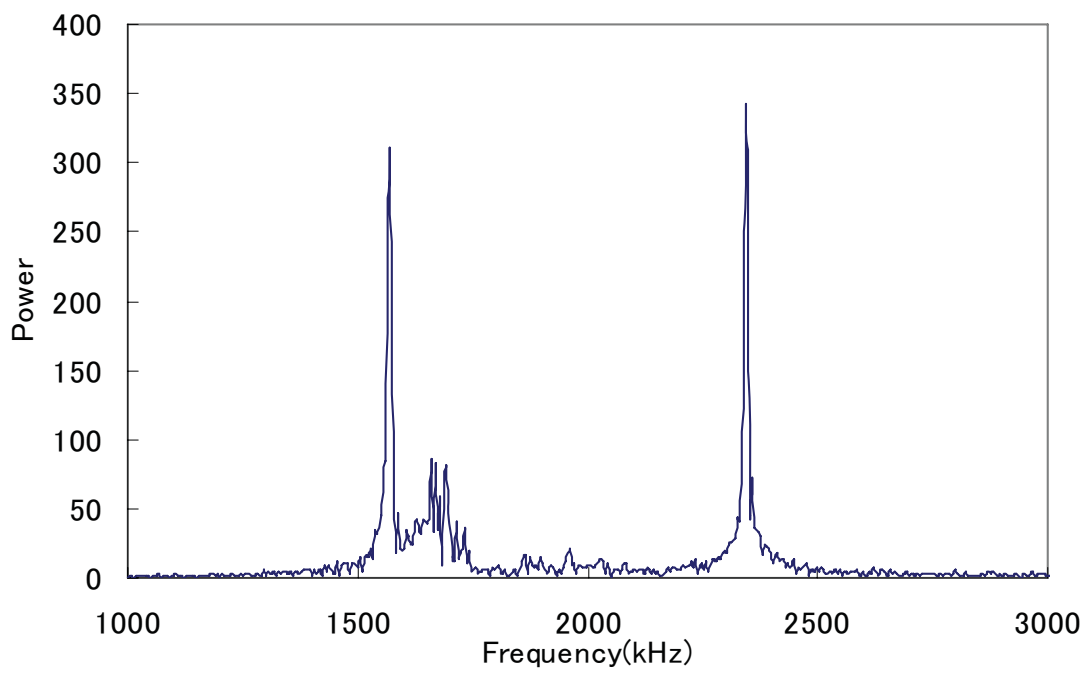


b)

**Figure 3.4.1-7 5mmT waveform of SUS400: a) PE method; b) PER method**



a)



b)

**Figure 3.4.1-8 2mmT waveform of SUS400: a) PE method; b) PER method**



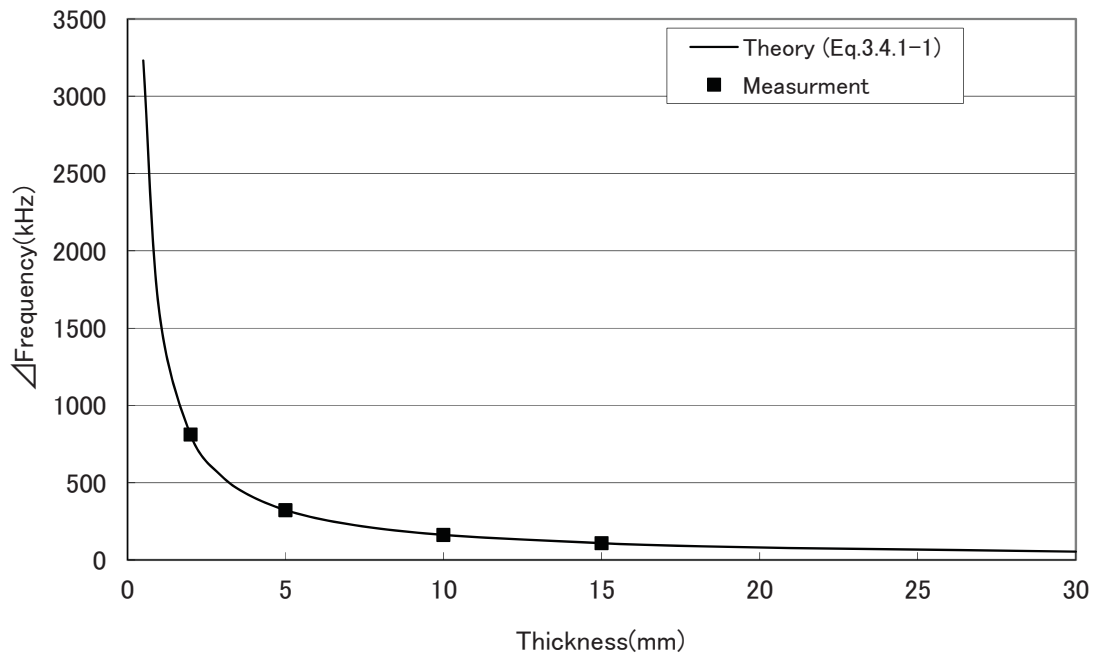
**Table 3.4.1-1 Measurement results for SS400**

Thickness (mm)	SS400				
	micrometer	PE	ΔT of PE	PER	ΔT of PER
2	2.00	-	-	1.99	0.01
5	5.02	5.01	0.01	5.02	0.00
10	10.00	10.01	-0.01	10.00	0.00
15	14.95	14.91	0.04	14.92	0.03

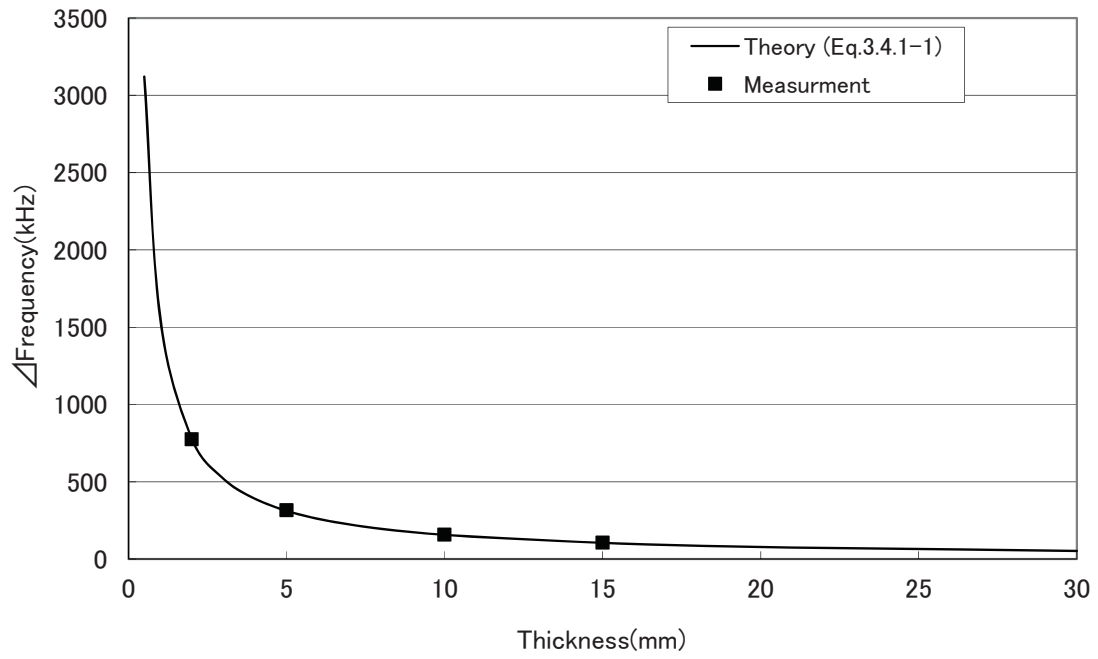
**Table 3.4.1-2 Measurement results for SUS304**

Thickness (mm)	SUS304				
	micrometer	PE	ΔT of PE	PER	ΔT of PER
2	2.00	2.03*	-0.03	2.01	-0.01
5	4.95	4.94	0.01	4.95	0.00
10	9.95	9.93	0.02	9.96	-0.01
15	14.85	14.83	0.02	14.86	-0.01

\* Some wave peaks coming from SUS304 2mm thickness were not able to be distinguished.



**Figure 3.4.1-9 Relationship between the resonance frequency difference and wall thickness for SS400 [T10\*]**



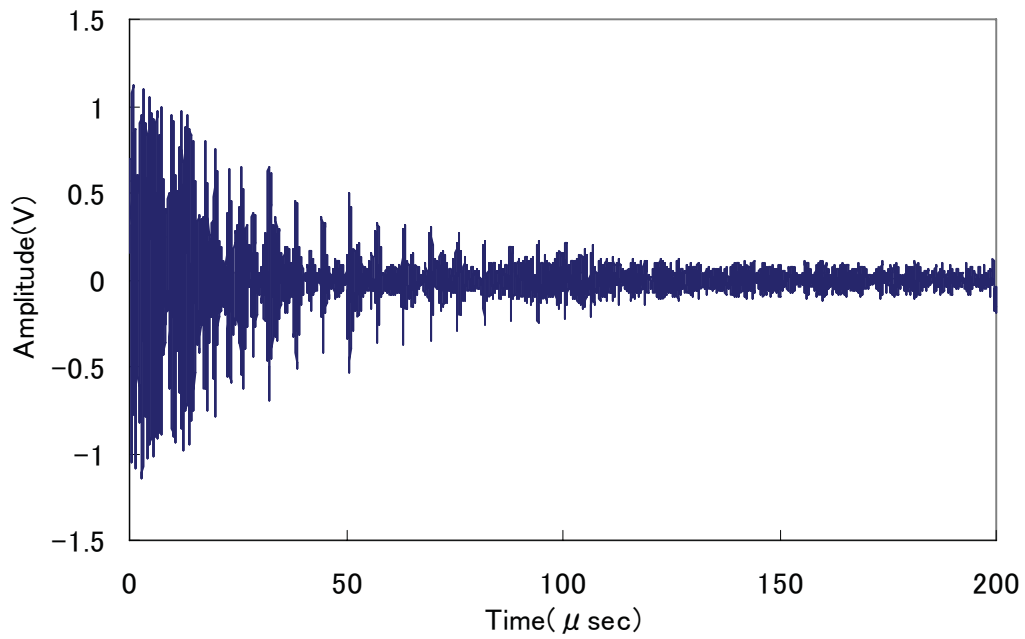
**Figure 3.4.1-10 Relationship between the resonance frequency difference and wall thickness for SUS304**

### 3.4.2 高温試験

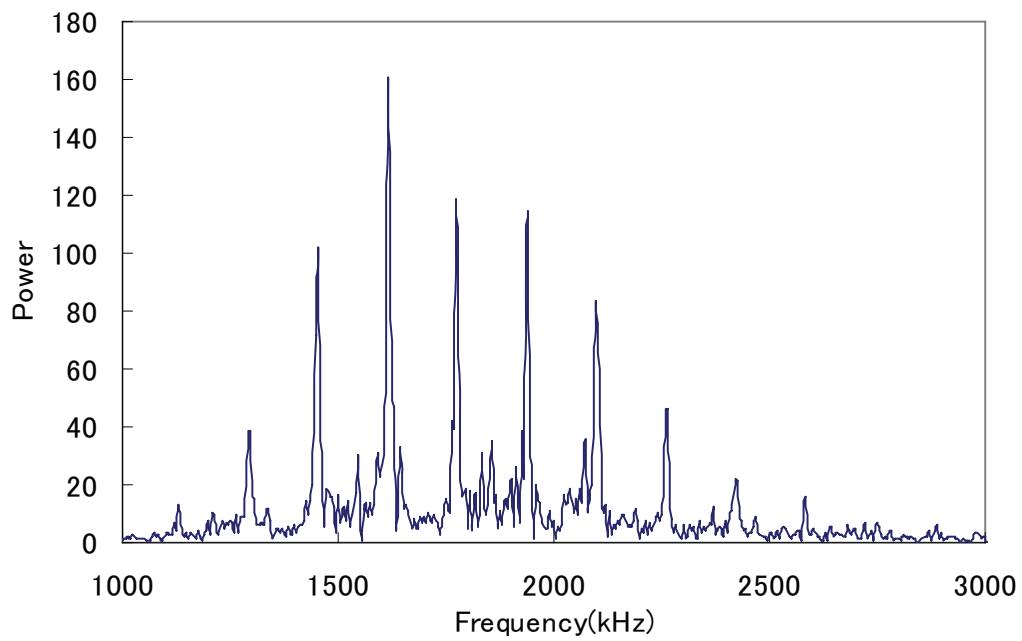
高温試験は、板厚 10mm の SUS304 試験片を利用し、室温から 250℃まで温度を変化させた際の板厚を評価する。なお、180℃以上の高温時には 3.3.2 で説明した磁石ノイズフィルタを用いる。開発目標は 200℃で減肉モニタリングに利用できる精度を確保して利用できることである。

図 3.4.2-1 から 3.4.2-7 が試験結果の受信波形である。それぞれの温度は、室温、100℃、150℃、180℃、200℃、220℃、250℃である。図 3.4.2-8 は、高温試験終了後に再度常温で測定した波形である。試験結果は、それぞれ上図が PE 法で測定したもの、下図が PE 法で得た波形を FFT 解析した波形であり、PER 法に用いる。150℃までは、PE 法、PER 法ともに受信ピークが明確であるが、180℃以上では PE 法は底面からの受信波形を分解しにくくなる。一方、PER 法では磁石フィルタの効果により底面との共振周波数のピークは維持されている。しかし、それも 220℃以上になると分解しにくくなる。よって、目標温度である 200℃までであれば、PER 法を用いたモニタリングが可能であるが、220℃以上であればさらなる改善を図る必要があることが確認された。また、図 3.4.2-9 は、各測定点での超音波音速である。図 3.4.2-10 は、PER 法で使用した周波数差  $\Delta f$  と温度の関係である。これらの音速や周波数差を用いて、板厚評価を行った。PE 法による評価結果を表 3.4.2-1、PER 法による評価結果を表 3.4.2-1 にまとめる。PE 法の 180℃以上、PER 法の 220℃以上の波形については、詳細に分析を行って底面からの受信波形を選定した結果である。各表の板厚参照値は、常温で測定した板厚に対し熱膨張を考慮したものとし、EMAT による測定結果と比較を行った。PE 法であれば、 $\pm 0.5\text{mm}$  以内、PER 法であれば、 $\pm 0.03\text{mm}$  以内の測定精度で測定できることが確認できた。PER 法は PE 法に比べ、高温では 1 桁測定精度が高いことがわかった。ただし、先にも述べたように PE 法で 180℃以上、PER

法で 220℃以上では底面からの受信信号の分解能が悪いため、実際のモニタリングでは評価が困難になると考える。現状では、目標とする 200℃での測定は PER 法が最適であると考え、さらなるノイズ低減などの改善を図ることで 250℃でも測定できる可能性があることが確認できたと考える。



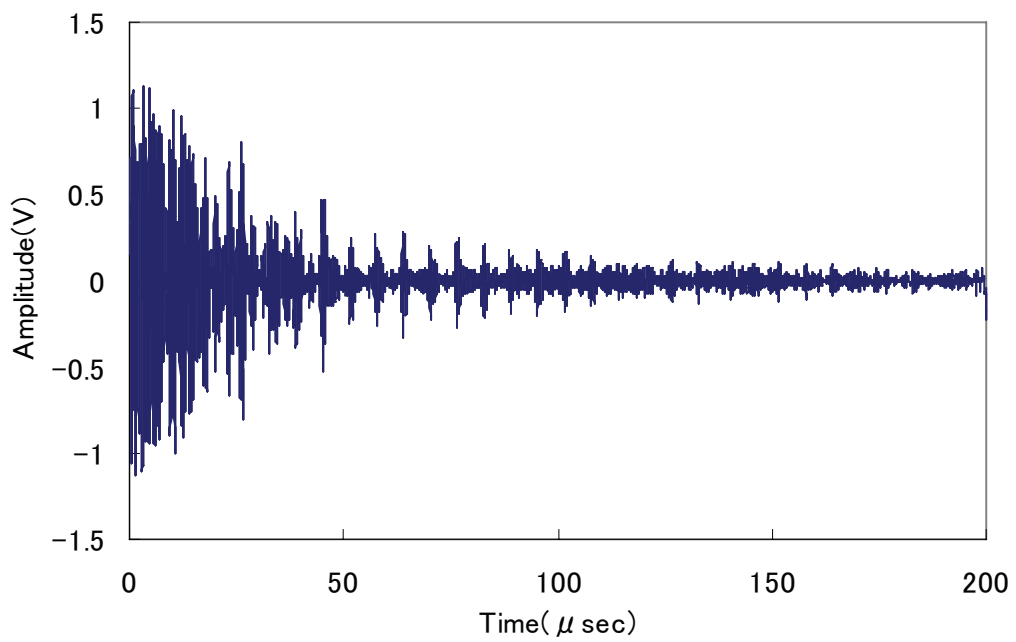
a)



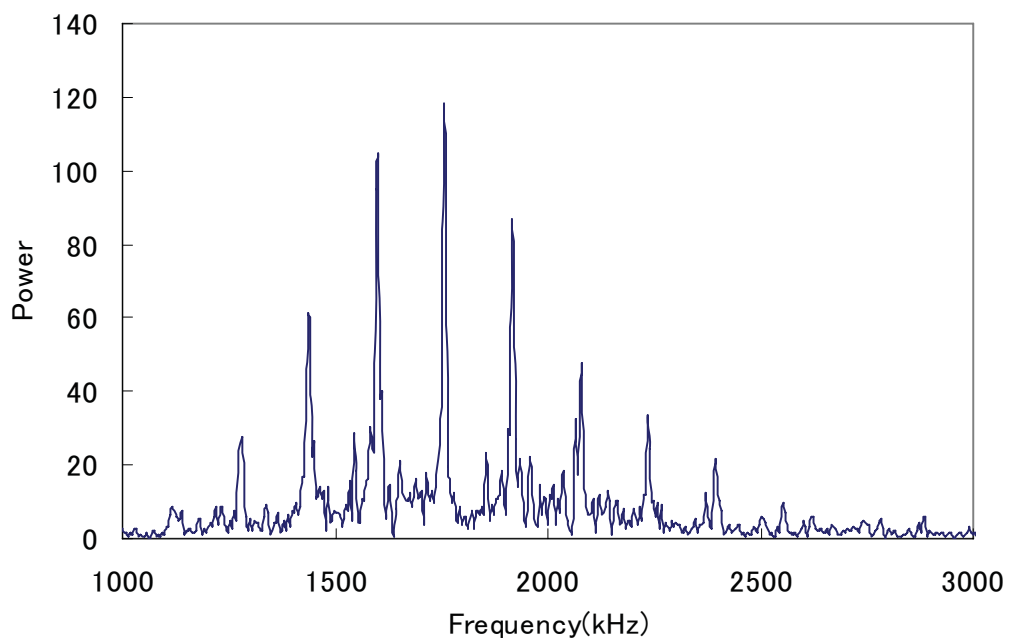
b)

**Figure 3.4.2-1 Room Temp. 10mm waveform: a) PE method; b) PER method**

[T10\*]

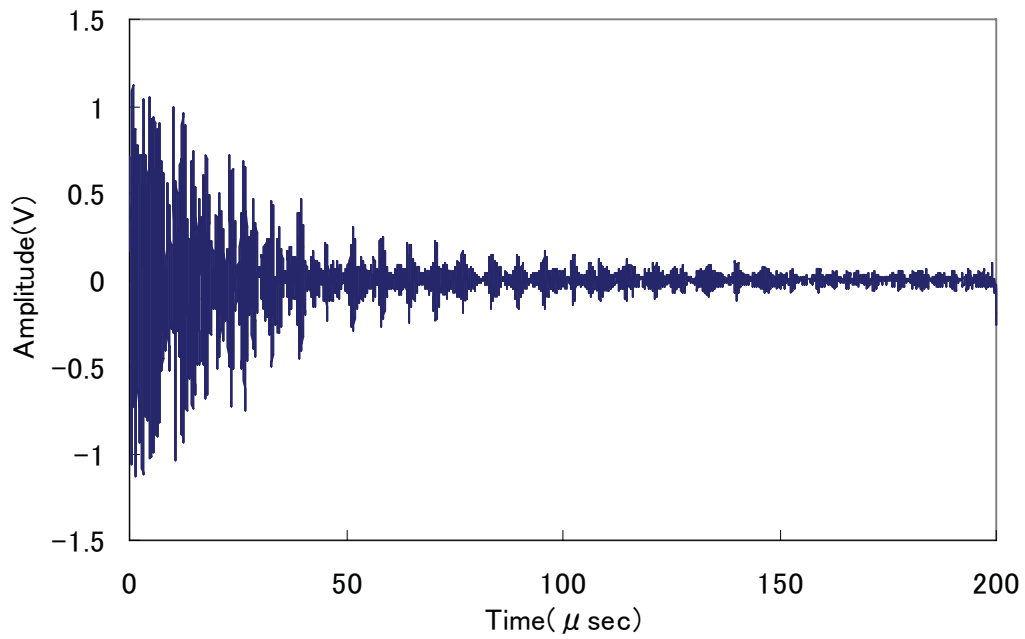


a)

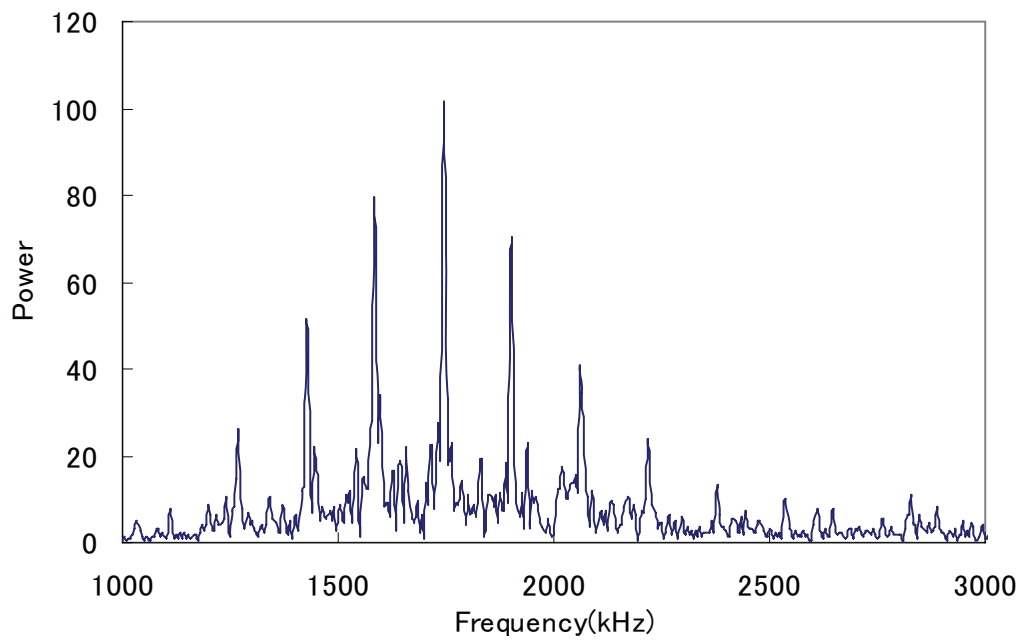


b)

**Figure 3.4.2-2 100°C 10mm waveform: a) PE method; b) PER method [T10\*]**



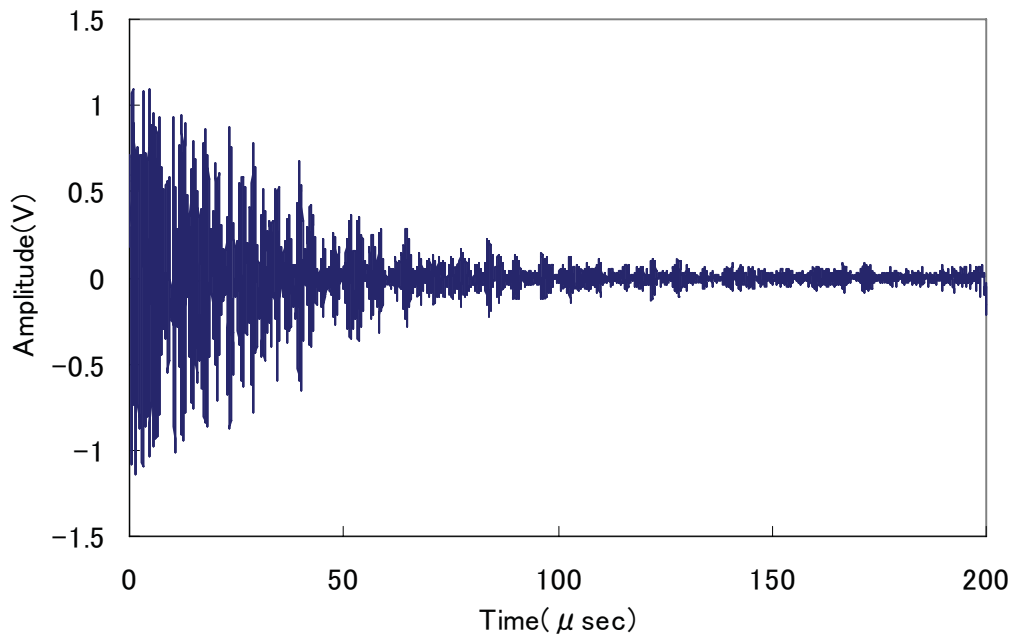
a)



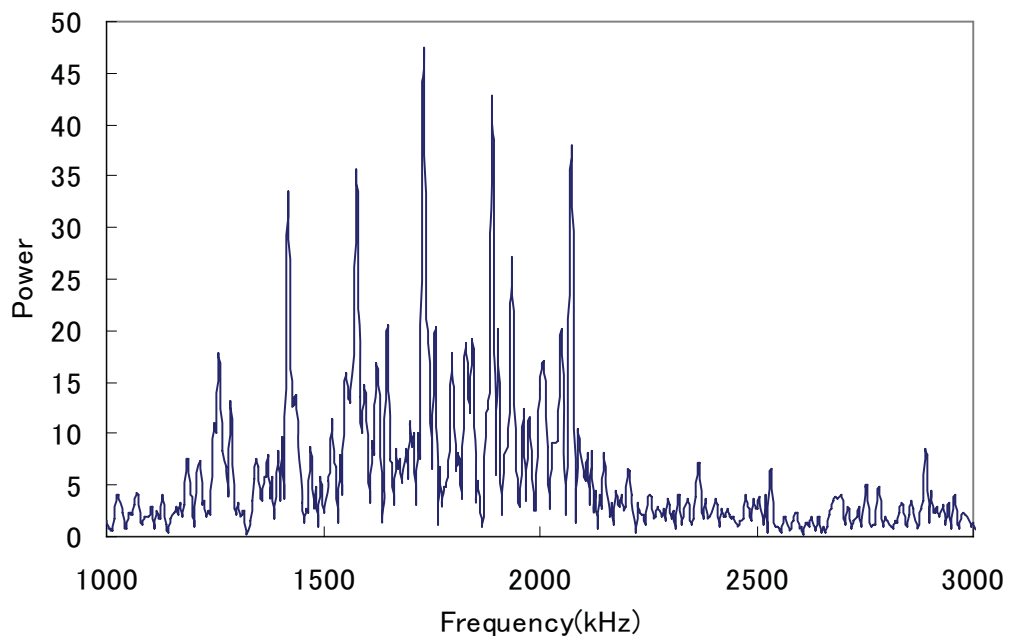
b)

**Figure 3.4.2-3 150°C 10mm waveform: a) PE method; b) PER method**



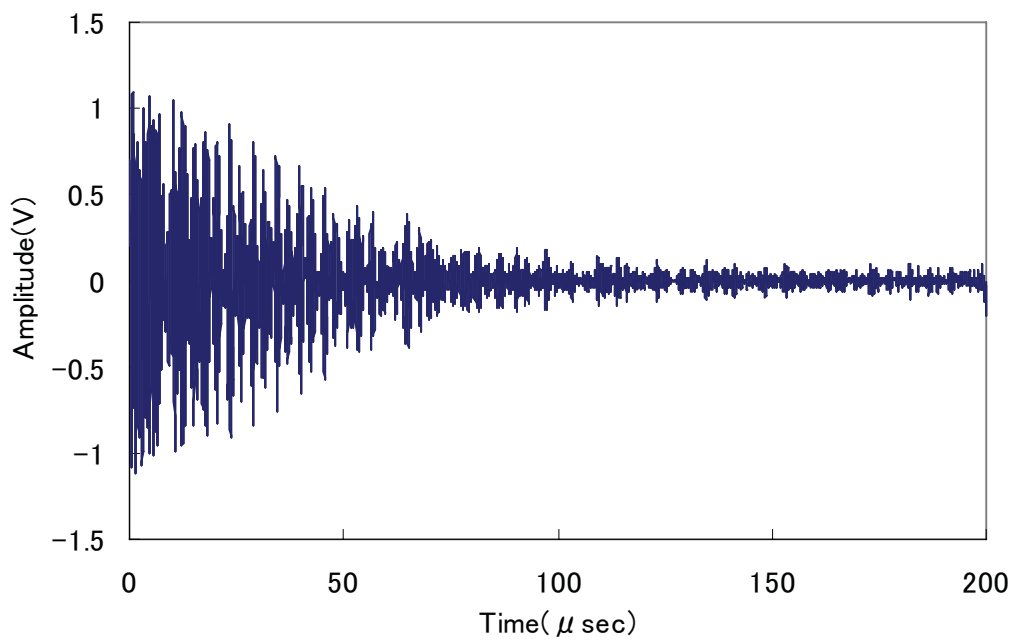


a)

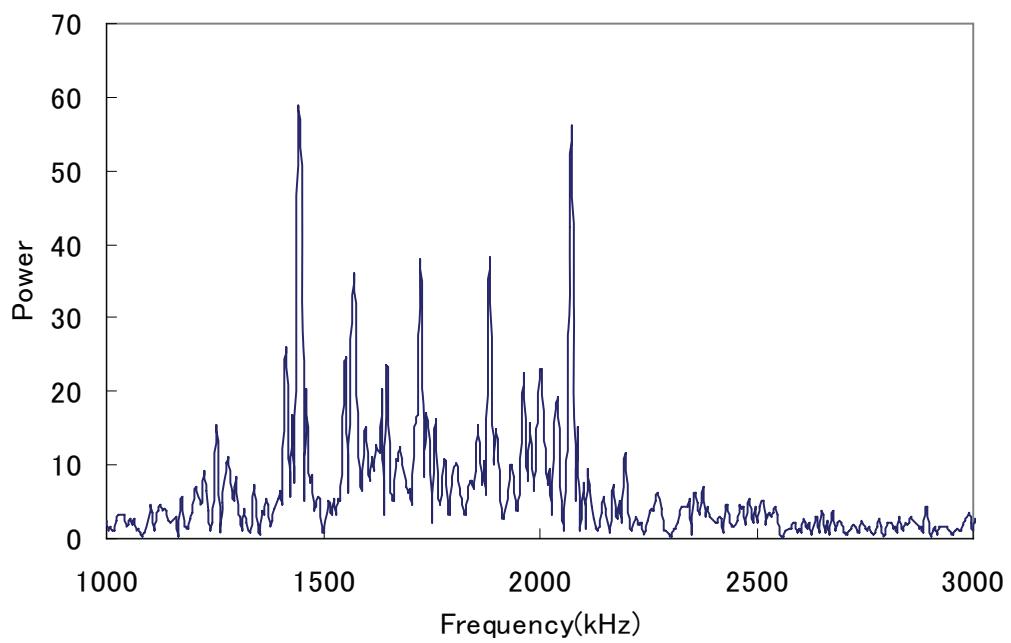


b)

**Figure 3.4.2-4 180°C 10mm waveform: a) PE method; b) PER method**

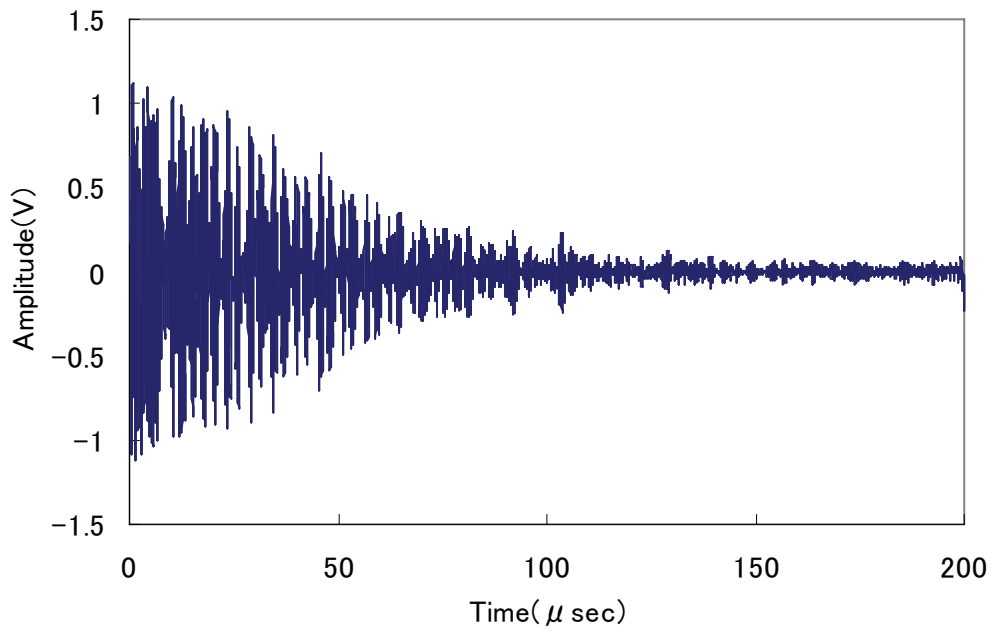


a)

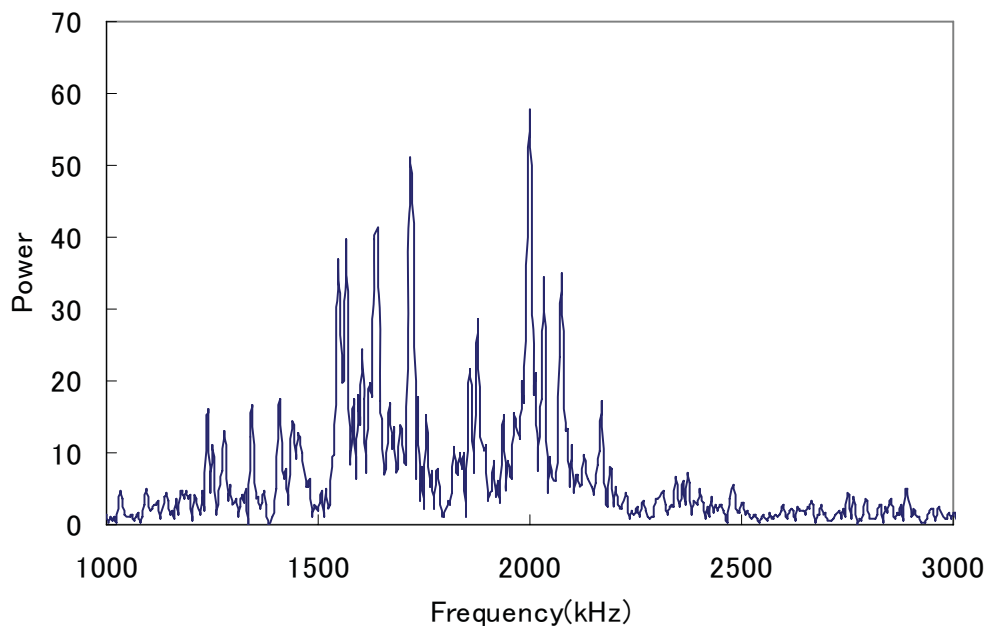


b)

**Figure 3.4.2-5 200°C 10mm waveform: a) PE method; b) PER method [T10\*]**

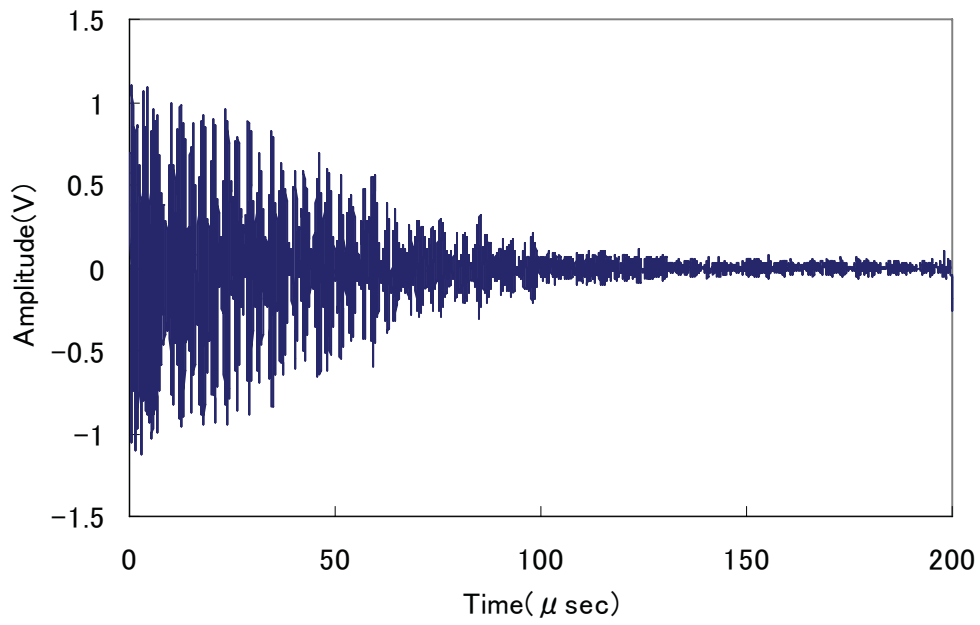


a)

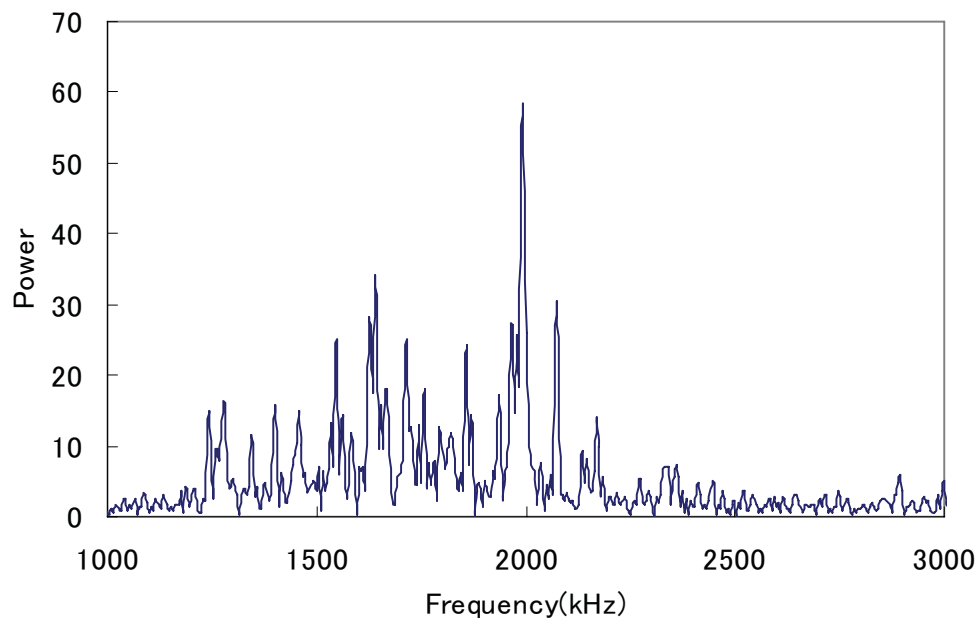


b)

**Figure 3.4.2-6 220°C 10mm waveform: a) PE method; b) PER method)**

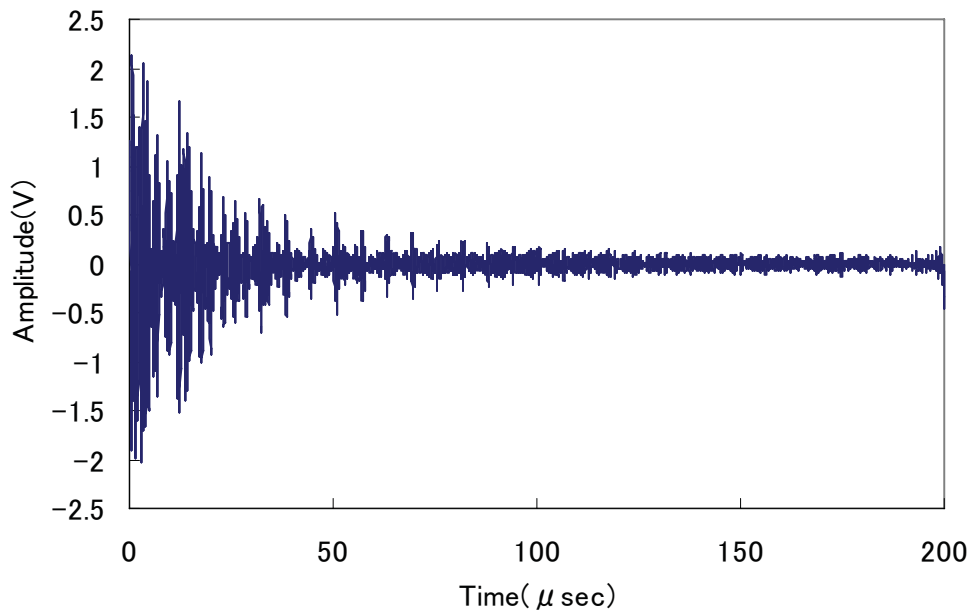


a)

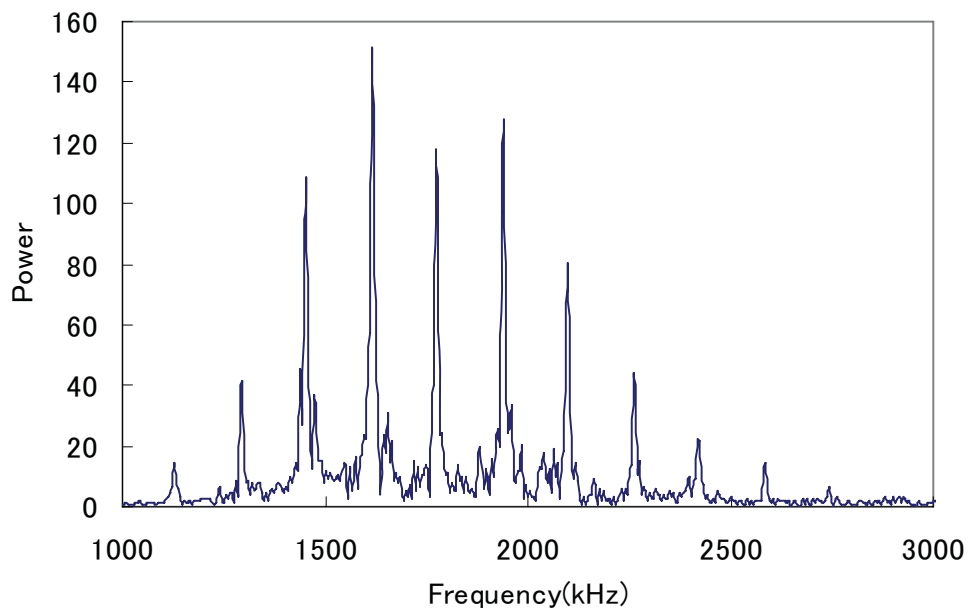


b)

**Figure 3.4.2-7 250°C 10mm waveform: a) PE method; b) PER method [T10\*]**

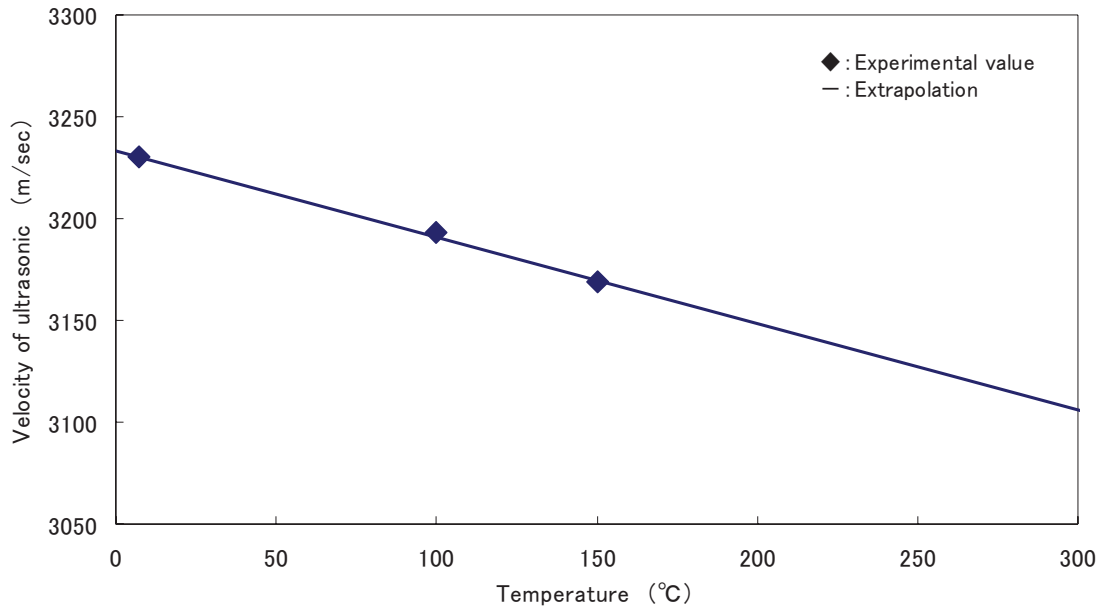


a)

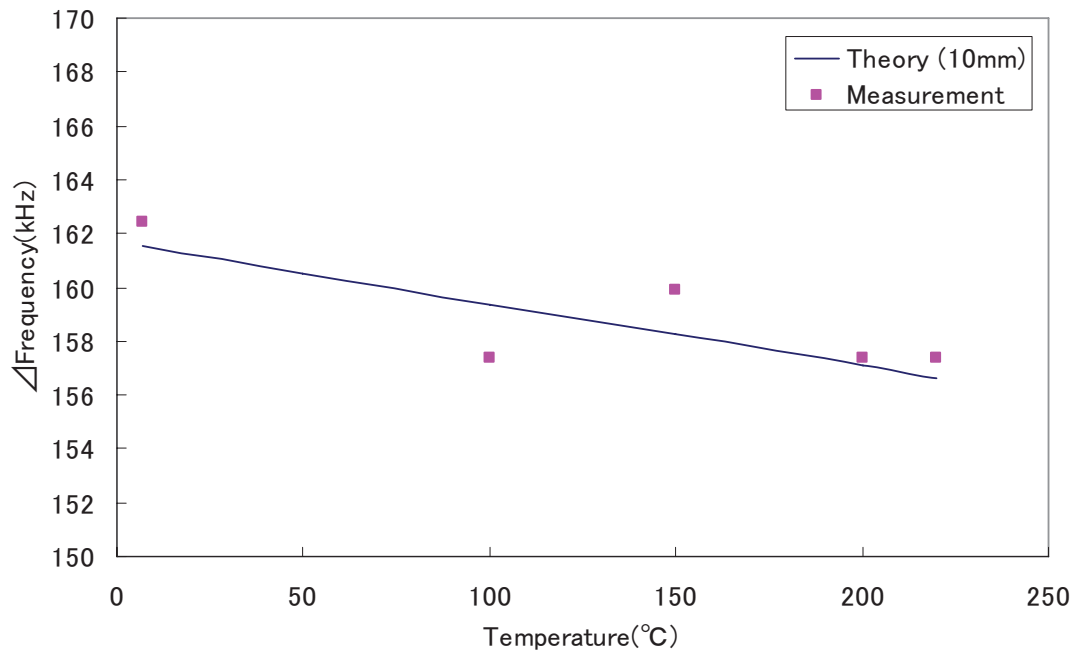


b)

**Figure 3.4.2-8 10mm waveform after high temperature test at room temperature:  
a) PE method; b) PER method**



**Figure 3.4.2-9 Variation of ultrasonic velocity with temperature [T10\*]**



**Figure 3.4.2-10 Variation of delta frequency with temperature**

**Table 3.4.2-1 Results of the wall thickness test using PE method at high temperatures (A=10.00mm)**

Temp. [°C]	Sonic velocity [m/s]	Real thickness with thermal expansion [mm]	Measured thickness using PE method [mm]	Error
RT	3230.6	10.00	10.01	0.01
100	3191.1	10.01	10.50	0.49
150	3169.9	10.02	10.01	-0.01
180	3157.2	10.02	10.01	-0.01
200	3148.7	10.02	10.28	0.26
220	3140.2	10.03	10.28	0.25
250	3127.4	10.03	10.34	0.31

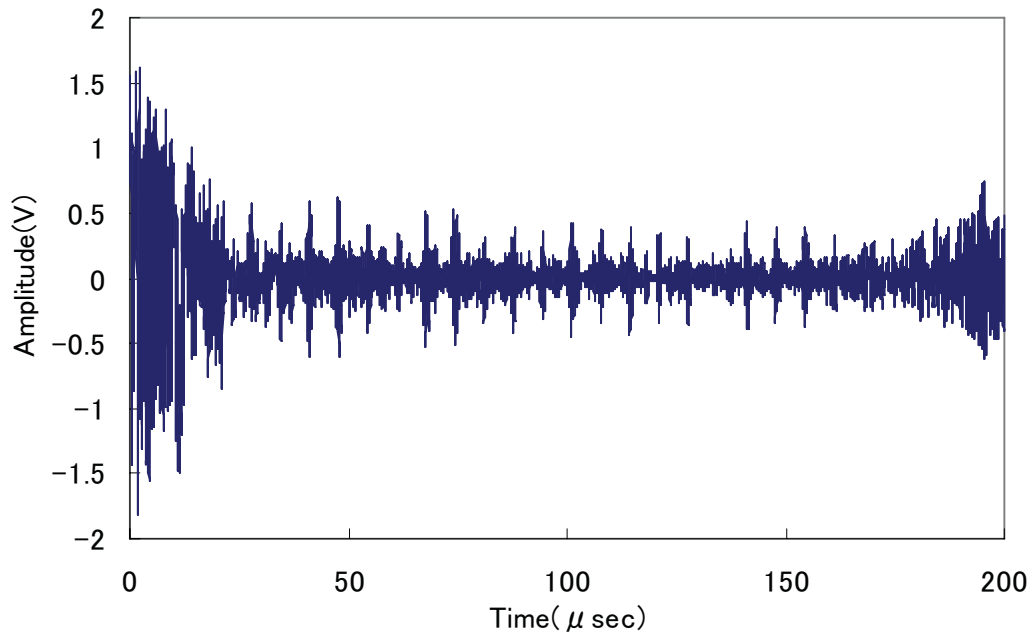
**Table 3.4.2-2 Results of wall thickness test using PER method at high temperatures (A=10.00mm)**

Temp. [°C]	Sonic velocity [m/s]	Real thickness with thermal expansion [mm]	Measured thickness using PER method [mm]	Error
RT	3230.6	10.00	10.00	0.00
100	3191.1	10.01	9.98	-0.03
150	3169.9	10.02	10.01	-0.01
180	3157.2	10.02	10.02	0.00
200	3148.7	10.02	10.02	0.00
220	3140.2	10.03	10.03	0.00
250	3127.4	10.03	10.03	0.00

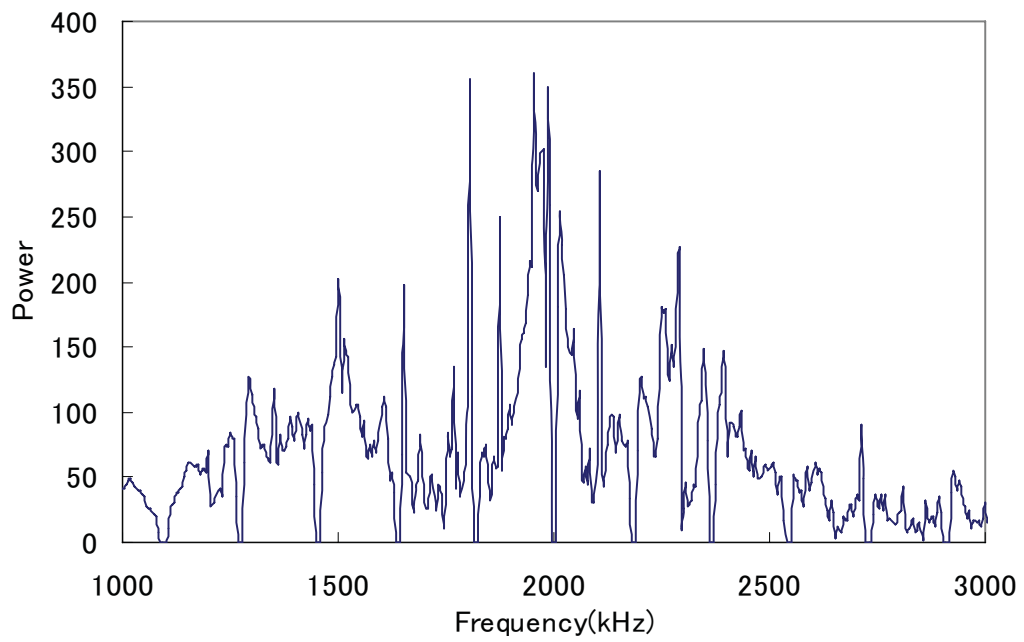


### 3.4.3 耐久試験

耐久試験は、200℃の高温環境下で18ヶ月(13000時間)以上経過後も目標精度を確保し必要な検出感度を得ることができるかを確認した。図3.4.3-1は耐久試験時の熱履歴である。恒温槽等の点検により7回の停止を行っているが、原子力発電所でも緊急停止などで計画外停止の可能性があることから熱ショックを7回与えたと考えれば、連続的に測定するよりも保守的環境で耐久性を確認することができたと考える。停止中の時間を除いた高温時のみの時間で15755時間(停止時間を含めると17424時間)の耐久性試験を行った。これは、21ヶ月21日に相当し、目標とする18ヶ月(13000時間)に余裕を持った時間である。図3.4.3-2から3.4.3-6は、200℃の高温環境下で試験時間が開始時、1000時間経過後、5000時間経過後、10000時間経過後、試験終了時15755時間後の底面からの受信波形である。試験結果は、それぞれ上図がPE法で測定したもの、下図がPE法で得た波形をFFT解析した波形であり、PER法に用いる。高温試験時には、PE法の波形には磁石ノイズフィルタは用いずにPER法のみを用いたが、耐久試験ではPE法にもフィルタを用いることで底面反射による多重反射が高温試験時に比べ判別しやすくなった。ノイズフィルタの有無による受信信号を比較したものが図3.4.3-7と3.4.3-8である。フィルタにより受信感度は下がるが底面反射を分解しやすくなったことがわかる。また、図3.4.3-9より受信感度は±1.5V程度のバラツキはあるものの、試験期間中ほぼ一定であることが確認できた。測定精度は、高温試験同様に $10 \pm 0.01 \text{mm}$ の精度が確認できた。図3.4.3-10は試験後の試作EMATの写真である。コイルを保護する耐熱フィルムの変色しているが損傷などは確認されなかった[T12]。よって、耐久性も原子力発電所の連続18ヶ月運転に十分耐えることができると判断する。

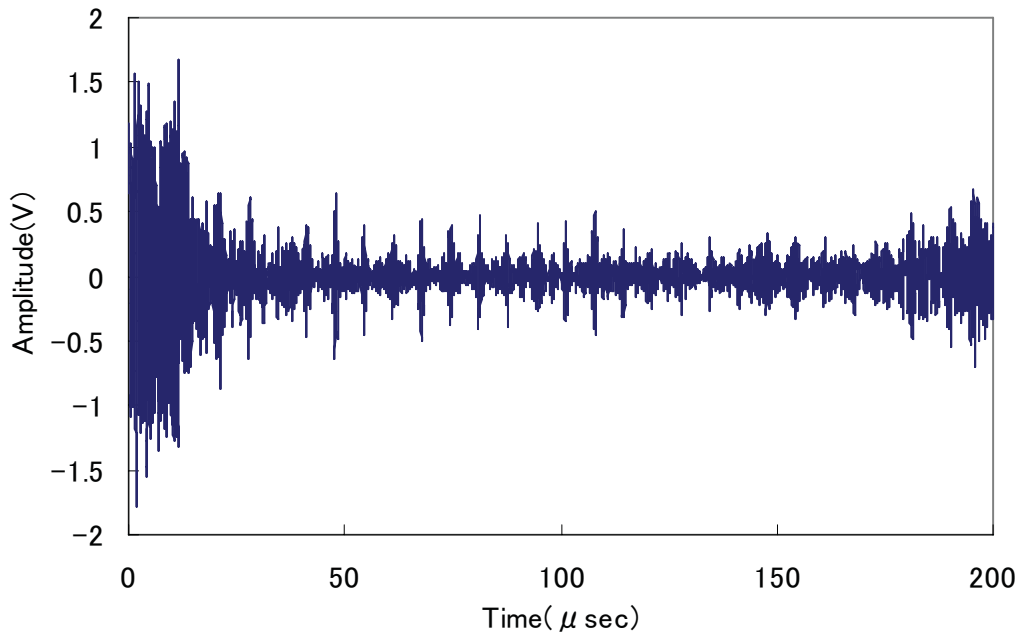


a)

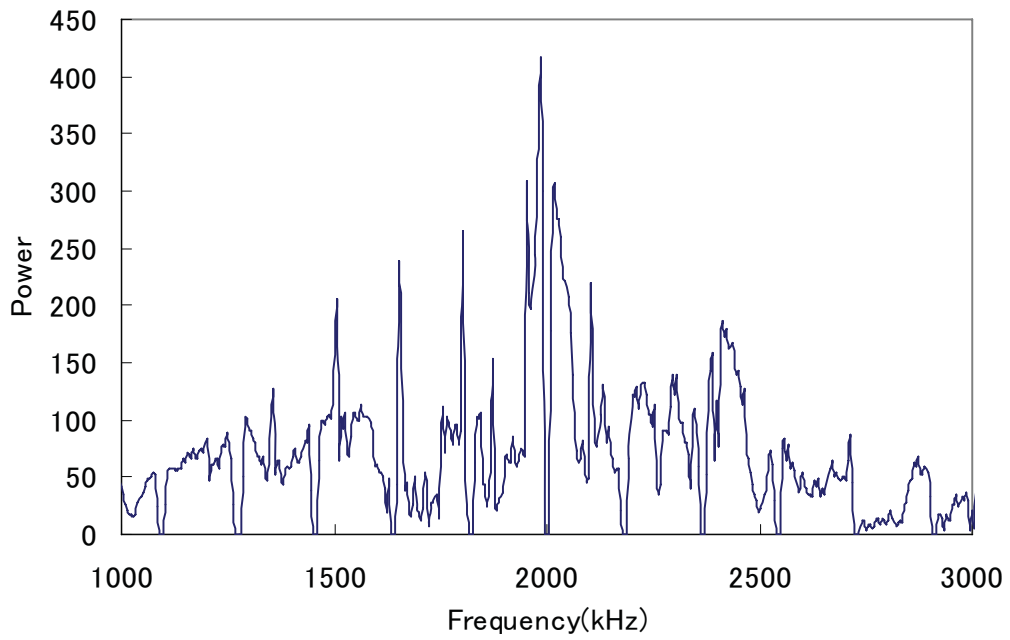


b)

**Fig.3.4.3-2 Waveform of SUS304, 10mm, at 200 degree C, test start: a) PE method; b) PER method**

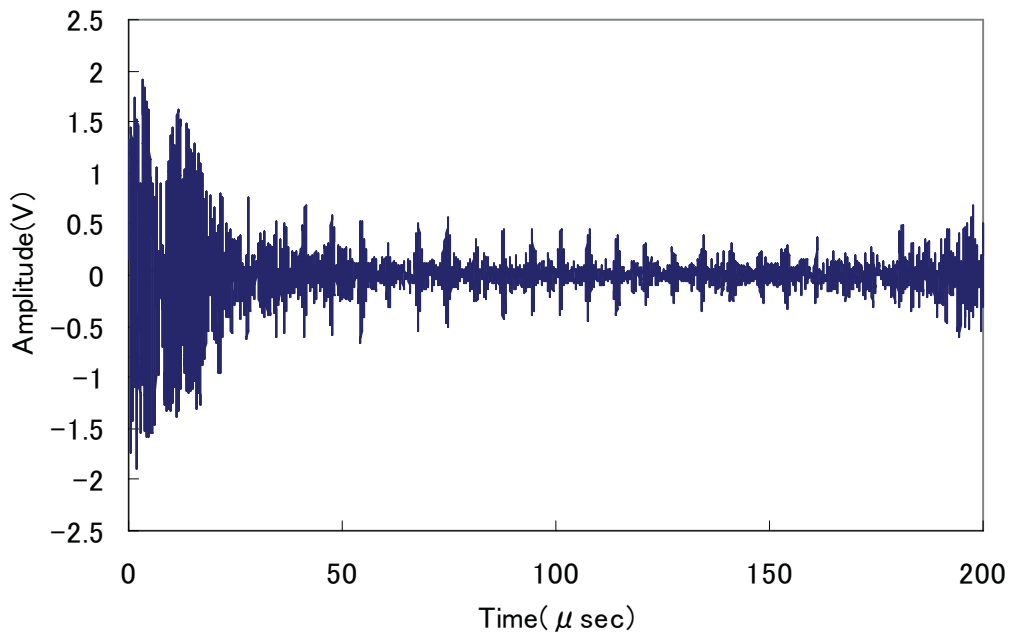


a)

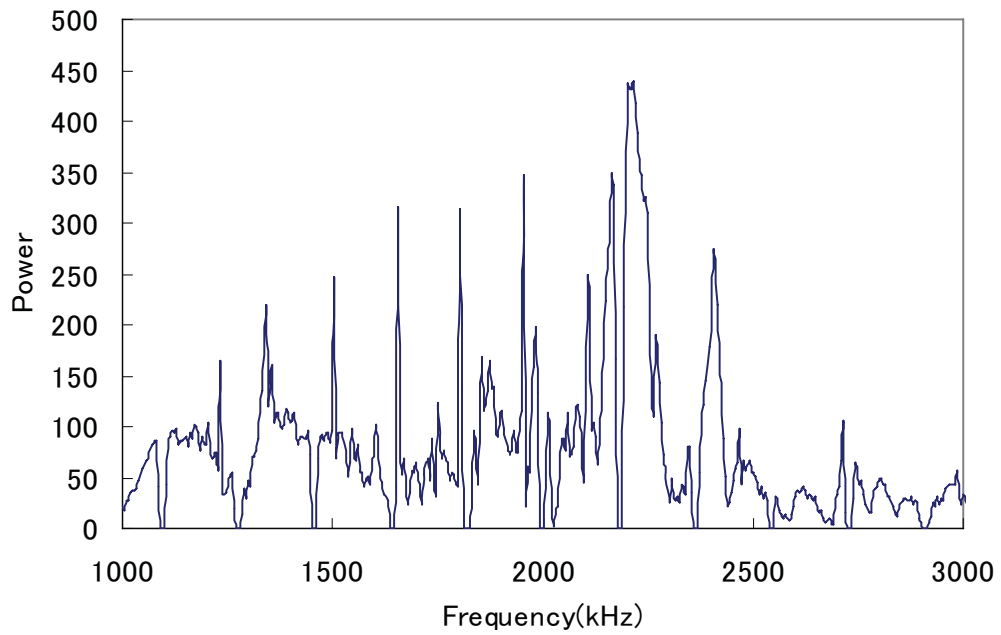


b)

**Fig.3.4.3-3 Waveform of SUS304, 10mm, at 200 degree C, 1000 hour in HT: a) PE method; b) PER method**

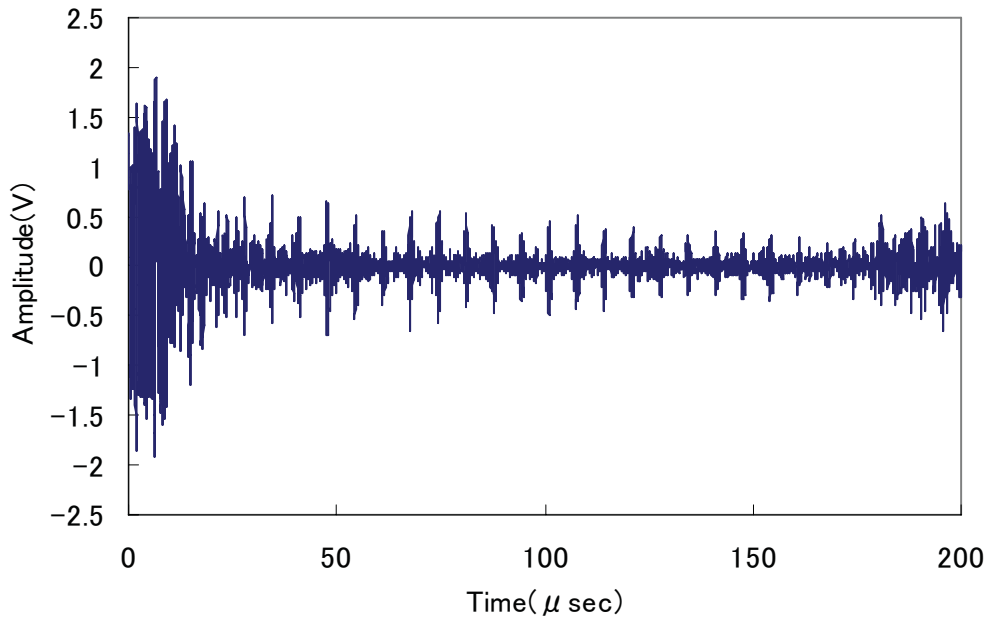


a)

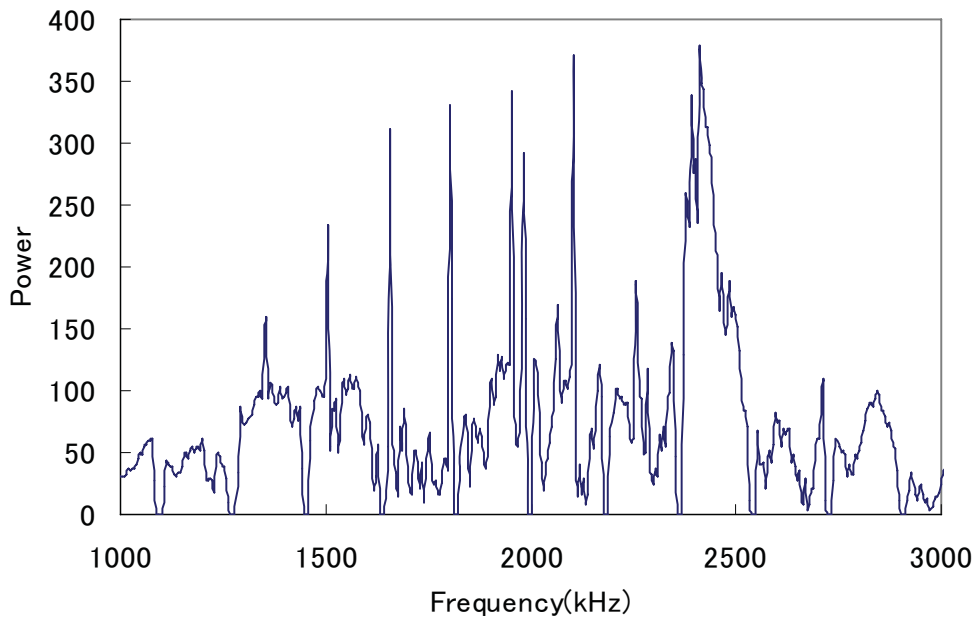


b)

**Fig.3.4.3-4 Waveform of SUS304, 10mm, at 200 degree C, 5000 hour in HT: a) PE method; b) PER method**

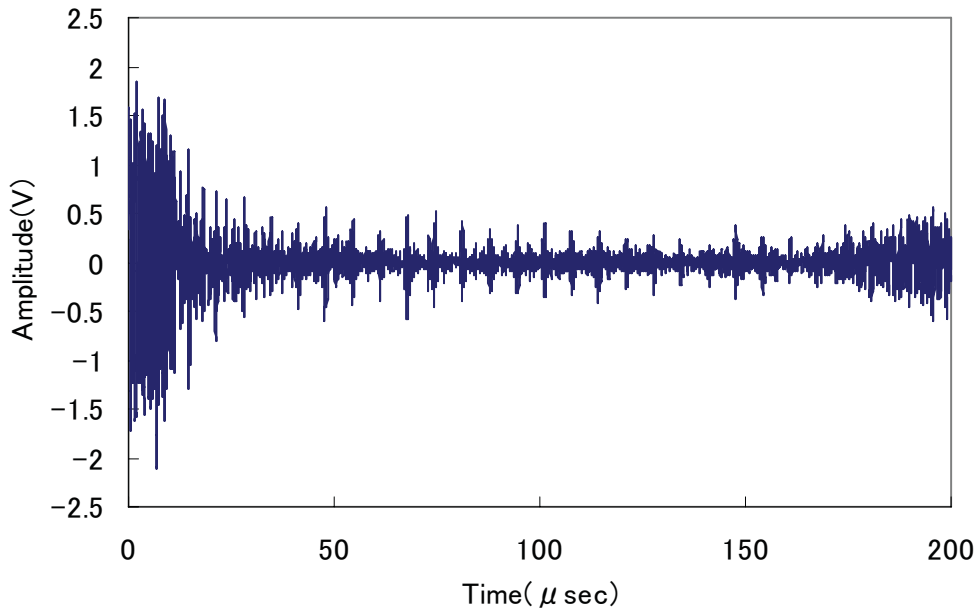


a)

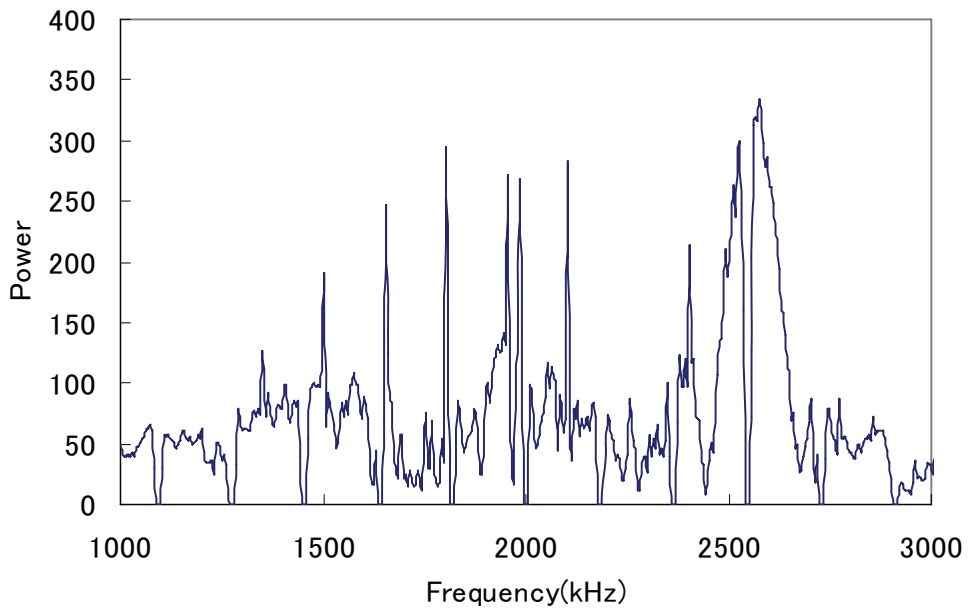


b)

**Fig.3.4.3-5 Waveform of SUS304, 10mm, at 200 degree C, 10000 hour in HT: a) PE method; b) PER method**

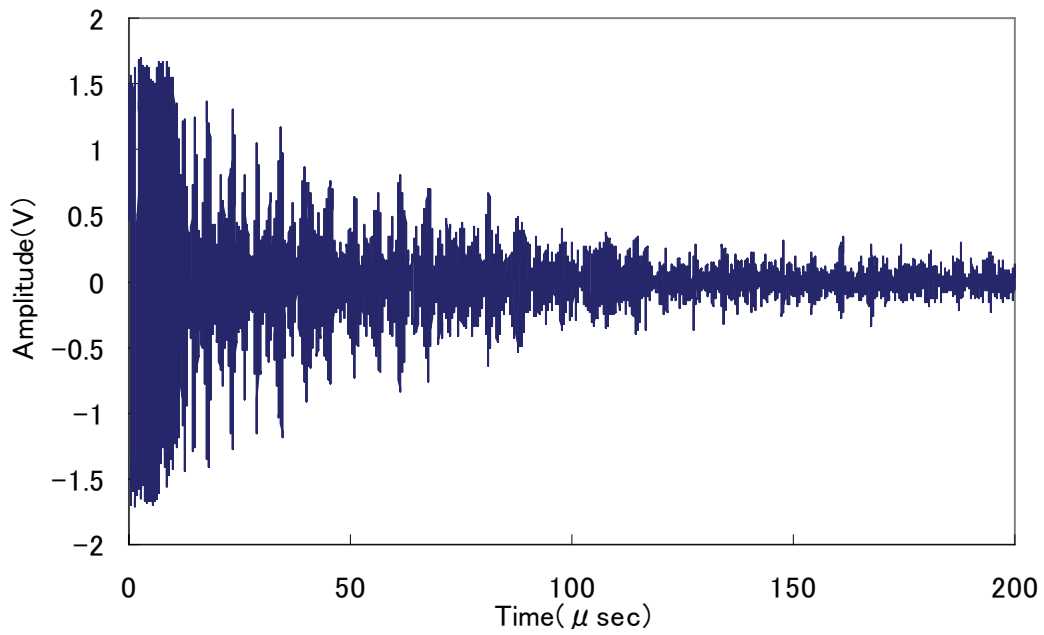


a)

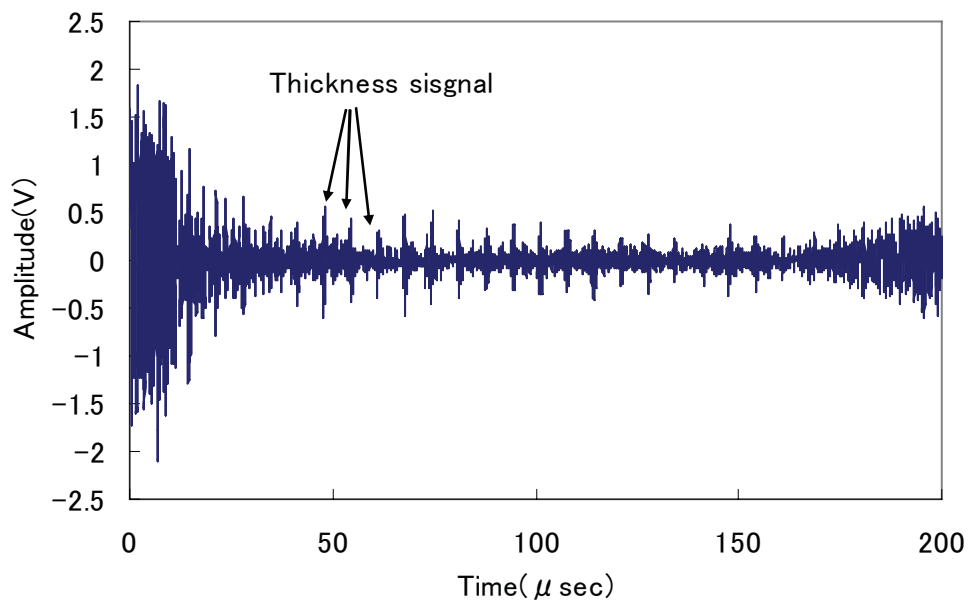


b)

**Fig.3.4.3-6 Waveform of SUS304, 10mm, at 200 degree C, 15755 hour in HT (Total test time 17404hour) : a) PE method; b) PER method**

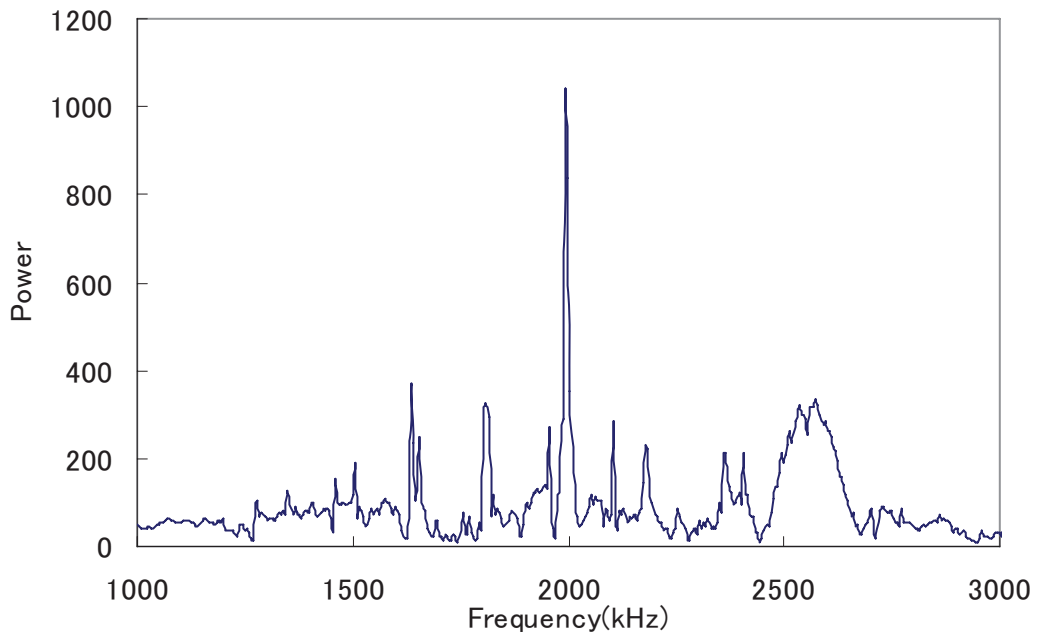


a)

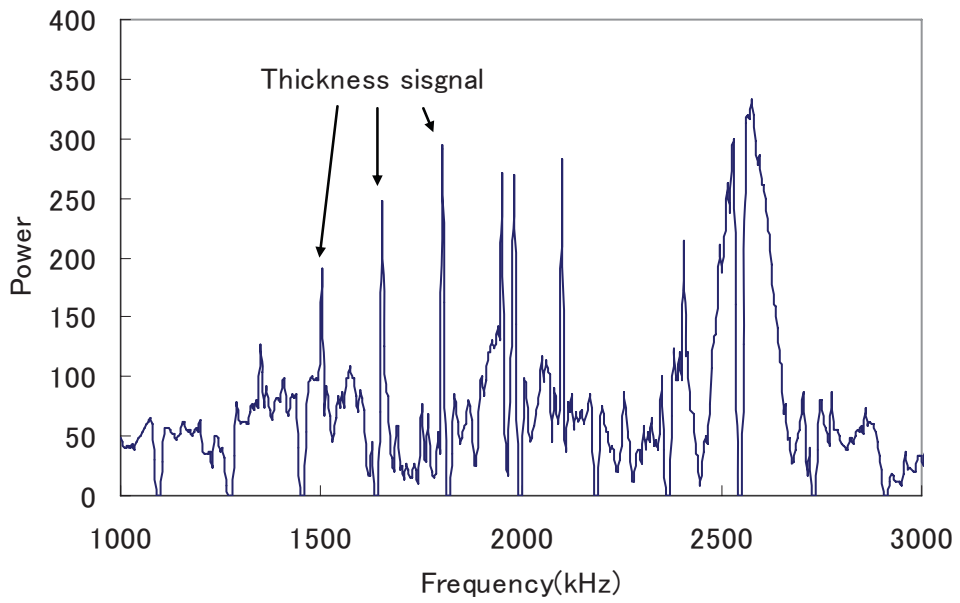


b)

**Fig.3.4.3-7 Waveform for SUS304, 10mm, at 200 degree C 15755 hour in HT using PE: a) with magnet noise; b) without magnet noise**



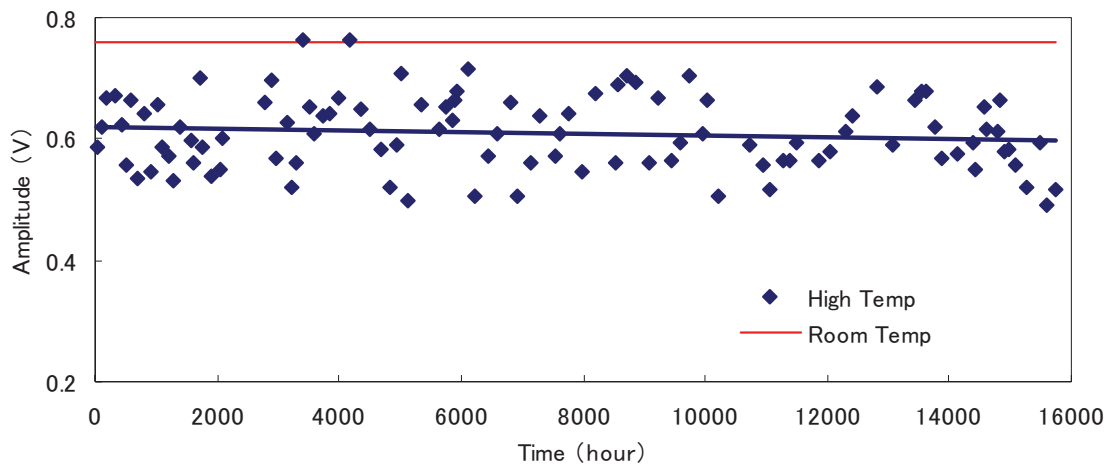
a)



b)

**Fig.3.4.3-8 Waveform of SUS304, 10mm, at 200 degree C, 15755 hour in HT using PER: a) with magnet noise; b) without magnet noise**





**Fig.3.4.3-9 Trend of the signal peak during durability test**



**Fig.3.4.3-10 Photograph of EMAT after the durability test**

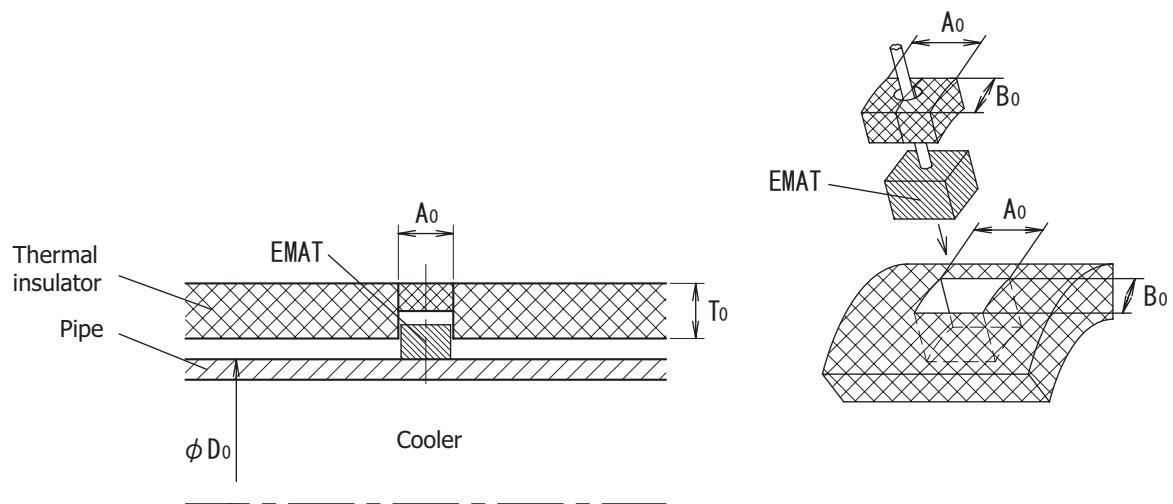
#### 3.4.4 センサ設置方法

3.4.3 節までで、EMAT 性能の確認を行い、配管減肉モニタリングに適用可能な精度、耐熱性、耐久性を有することを確認した。もう一つの課題は、センサの設置方法についてである。

原子力発電所の冷却系配管は通常、保温材で覆われている。そこで、図 3.4.4-1 のように配管の一部を切欠き、パッケージ保温とする。保温材内に EMAT を埋め込み、配線のみを外に出してコネクタ取り合いとする方法が取り付けの容易さ、メンテナンス性、測定時の配線性に優れた設置方法である。

今回対象としている原子力発電所の水・蒸気系配管は炭素鋼が用いられている。炭素鋼の場合保温材内の EMAT は被検査体に磁石の磁力により自己保持される。常磁性体のオーステナイト系ステンレス鋼の場合は自己保持はされないが、パッケージ保温材内でバネを設け、バネ力により保持することが可能である。

また、現状の技術では、EMAT を原子力発電所内に数千点取り付けの場合、バースト波発生装置までの配線が問題になる。これは、配線距離が数百メートル以上となるような場合にプリアンプを設けるとしても信号が減衰するということ。配線距離を短くするためにバースト波発生装置を多数配置とした場合、非常にコストがかかることである。減肉は常に測定し続ける必要もなく、数か月に 1 度の測定によるモニタリングでよい場合、ポータブルなバースト波発生装置を開発し、運転員や保守員が保温材より出たコネクタに接続して測定する方法も考えられる。バースト波発生装置の開発は今後の課題である。



**Fig. 3.4.4-1 The installation method of a sensor in the thermal insulator. Removal is possible in one-touch step with a package thermal insulator. Therefore, an exchange is easy even if EMAT breaks down [T17\*].**

### 3.5 結言

本研究では、ハイブリッドセンシングの前提条件として EMAT を用いた高精度測定が可能であるかを検証した。その結果、PE 法と PER 法を用いることで配管減肉モニタリング用 EMAT を低コストで作成し、高い精度で板厚を測定することが検証できた。

これまで PE 法を用いて、 $4\text{mm} \pm 0.3\text{mm}$  の精度でなければ測定できなかった垂直 EMAT に対し、PER 法を用いることで、炭素鋼、ステンレス鋼であっても  $2\text{mm} \pm 0.03\text{mm}$  以下の精度で測定可能であることを試験により確認した。これにより、目標とする  $2\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$  以下の精度を達成した。PER 法は、EMAR 法に比べ周波数を挿引する必要がないことから、EMAR 法より検査時間のさらなる短縮化が可能である。また、1つのセンサを用いて、1度の超音波の発信により2種類の測定方法を適用できるハイブリッドセンシングが可能であることも確認できた。これは、PER 法に用いている板厚測定式は、周波数差に反比例することから、

1つのセンサを用いて PER 法は薄い配管用、PE 法は厚い配管用と用途を分けることができることを意味する。また、EMAT は磁石、コイル、ケーブル、ケーシングの4つの構造材で製作することが可能であり、1つ1つの構造材のコストは数ドル以内である。実際にプラントに適用する場合には、数千から数万個のセンサを製造するスケールメリットを考慮すると1つのセンサの製造が10ドル以下で製造できる可能性がある。低コスト化は、事業者が手法を適用しやすくするために重要であり、今後、温度による音速の変化を測定することで、配管疲労度の確認などへの応用も期待できる。

実際に原子力発電所に適用するためには、高温特性を評価する必要があることから、高温試験を実施した。さらに、18ヶ月連続運転が可能となったため、18ヶ月に余裕を持たせた耐久試験も実施した。

高温試験では、150°Cを超える領域では磁石からの反射信号が大きくなることから磁石用ノイズフィルタが必要であることがわかった。このフィルタを用いて、250°Cまでの高温試験を実施した。本試験に際し、SUS304の高温での音速データがなかったが、本研究の中で音速の温度依存性を示し、近似式により250°Cまでの音速を予測できることを示した。

耐久試験については、PE法にも磁石ノイズフィルタを用いることで高温試験時よりも受信ピークを鮮明にすることを確認し、18ヶ月連続運転に余裕をみた約22ヶ月の間高温中でデータを測定した。この間、7度の恒温槽のシャットダウンが熱ショックとして与えられたが、センサに異常はなかった。受信感度の著しい低下や測定精度への影響はなかった。

これらの結果より、原子力発電所の配管減肉に対し、運転中モニタリング可能なEMATの開発、新しい信号処理手法であるPER法による測定精度の向上と2種類の測定法が1つのセンサで可能なハイブリッドセンシングの適用、高温耐

久性、EMAT の設置方法が検証された。検証の結果、EMAT を用いた配管減肉モニタリングが可能であると考ええる。

今後の課題として、原子力発電所に適用する場合、超音波発生装置であるバースト波発生装置のコンパクト化などを提言する。

## 第4章

### ハイブリッドセンシング用センサの研究

#### 4.1 緒言

従来の EMAT の利用方法は、高温でありながら、接触媒質が不要である長所を活かし、減肉測定[T10\*]、欠陥検出[X3]、疲労検知[O27]、ガイド波発生による広域モニタリング[H5]などの研究が行われてきた。しかし、いずれも1つのセンサで1つの物理量の測定に用いるものであった。そこで、第3章では、1つのセンサを用いて1回の測定で2種類の評価を行うハイブリッドセンシングが可能であることを示した。第3章で測定した物理量は減肉量を対象としただけであるが、受信波の共振周波数成分を評価する PER 法は、被検査体内の共振周波数を評価する EMAR 法と同様に材料の疲労評価[O27, O28]などにも応用が期待されることから異なる2つの物理量の測定へも応用可能である。本研究は複数の計測センサを1つのユニットとするセンサフュージョン技術[S2]ではなく、元々測定できる物理量は1つであったセンサのポテンシャルを最大に活かし、複数の物理量を測定するハイブリッドセンシングを目標にしている。そこで本章では、EMAT を用いて減肉量だけでなく、その他の物理量測定を可能にするハイブリッドセンシング用 EMAT の研究を行う。そのために、EMAT 構造を見直し、シンプルな構造ながらも複数の物理量の測定が可能である EMAT を研究した。具体的には、1組の EMAT により配管表面温度、減肉量、内部流体の温度の3種類の物理量の高精度測定を行うものである。本研究の成功により、安価でありながら、高精度な局所モニタリングを実施することができるセンサ提供が可能となる。

## 4.2 EMAT の試作

### 4.2.1 設計条件

センサ設計条件は、第 3 章同様に配管減肉モニタリングの必要性が高まった関西電力美浜発電所 3 号機、配管減肉による破断事故の条件[N5, T16]を参考とした。なお、高速増殖炉(以下、FBR)においても水・蒸気系配管の条件は同じであるため適用できる。ただし、FBR の主冷却配管は、内部流体がナトリウムであり、軽水炉よりも高温であるが、図 4.2.1-1 [J6]に示すとおり、配管材料として高温強度に優れたステンレス鋼を採用しており、炭素鋼の高温水中の腐食速度に比べて、高温ナトリウム中の腐食減肉の速度は桁違いに小さい。また、ナトリウム中の酸素濃度を管理することによりナトリウム環境下では有意な腐食が生じないことが確かめられている[T15]。そのため、運転中の酸素濃度は、1 次系で 3ppm 以下、2 次系で 10ppm 以下であることを監視し、腐食減肉を防止している。これらのことから、水・蒸気系配管での減肉をターゲットとし、温度 200℃、配管材質炭素鋼(SS400)、板厚 10mm としてセンサ設計を行った。

EMAT は、永久磁石を用いた構造であることから、磁石の保持力を利用し、3.4.4 で議論したパッケージ保温材との組み合わせにより、着脱が容易で保守性の高い取り付けが可能な小型 EMAT とする。



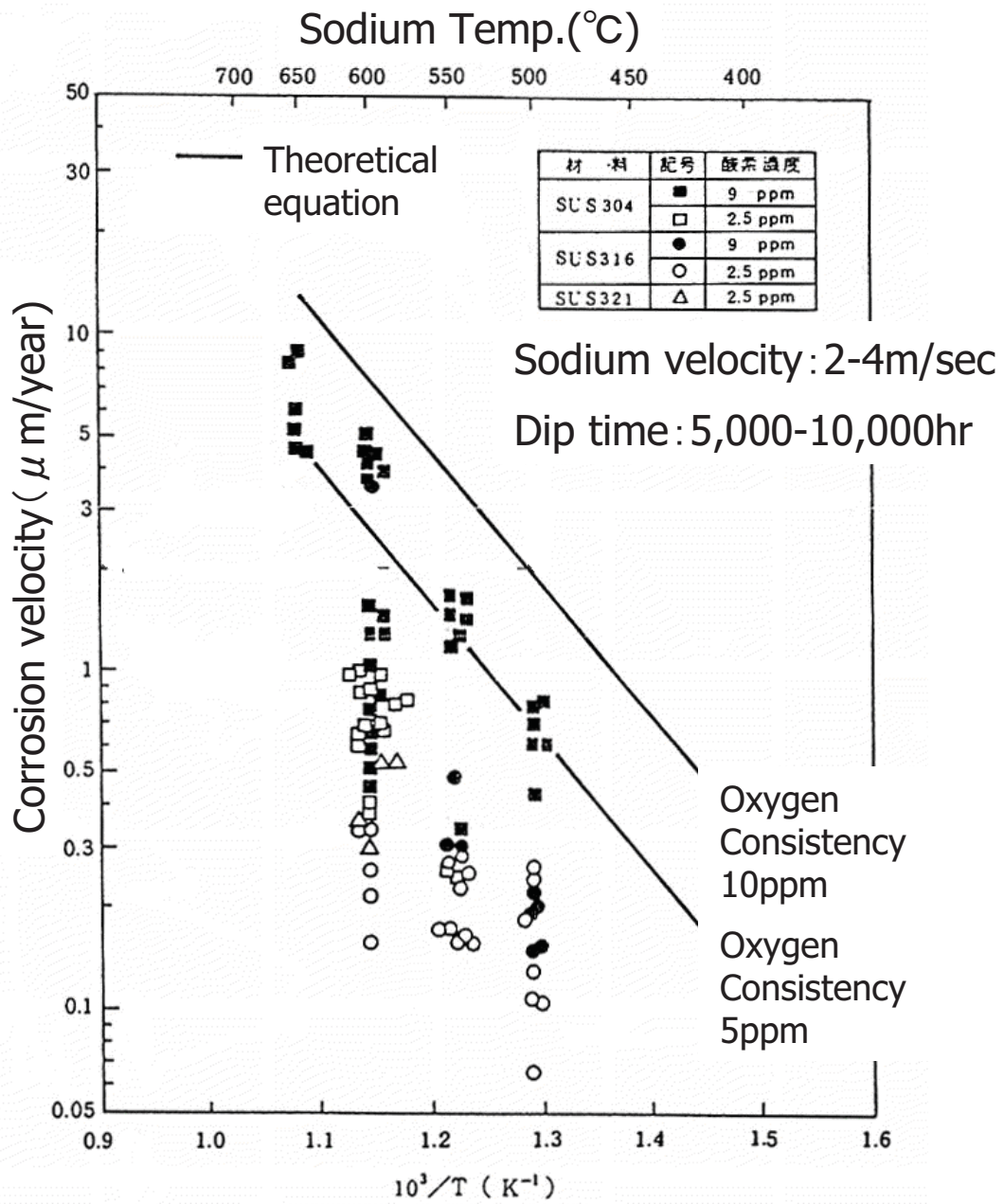


Fig.4.2.1-1 The corrosion velocity of stainless steel [J6, T17\*]

#### 4.2.2 設計と試作

1組の EMAT により配管表面温度、減肉量、水温の3種類の物理量の高精度測定を行うためには、1つの EMAT で減肉測定用の横波(SH波)と水中を伝播させる縦波の両方を発生させることができ、パッケージ保温材料内に収まる小型 EMAT の設計が必要である。そこで、図 4.2.2-1 の様な EMAT の設計を行った。2.1.2 で説明したように、横波(SH波)用 EMAT と縦波用 EMAT では基本的構造が異なる。しかし、構成される材料としては垂直方向に磁場を有する永久磁石と渦巻きコイルと同じである。そこで、コイルを2つ用意し、図 4.2.2-1 の構造とすることで、1つの EMAT で横波(SH波)と縦波の2種類の波を発生させることができる構造とした。コイルに対する印加電流のタイミングをずらすことで横波(SH波)、縦波を交互に打ち分けることが可能になる。

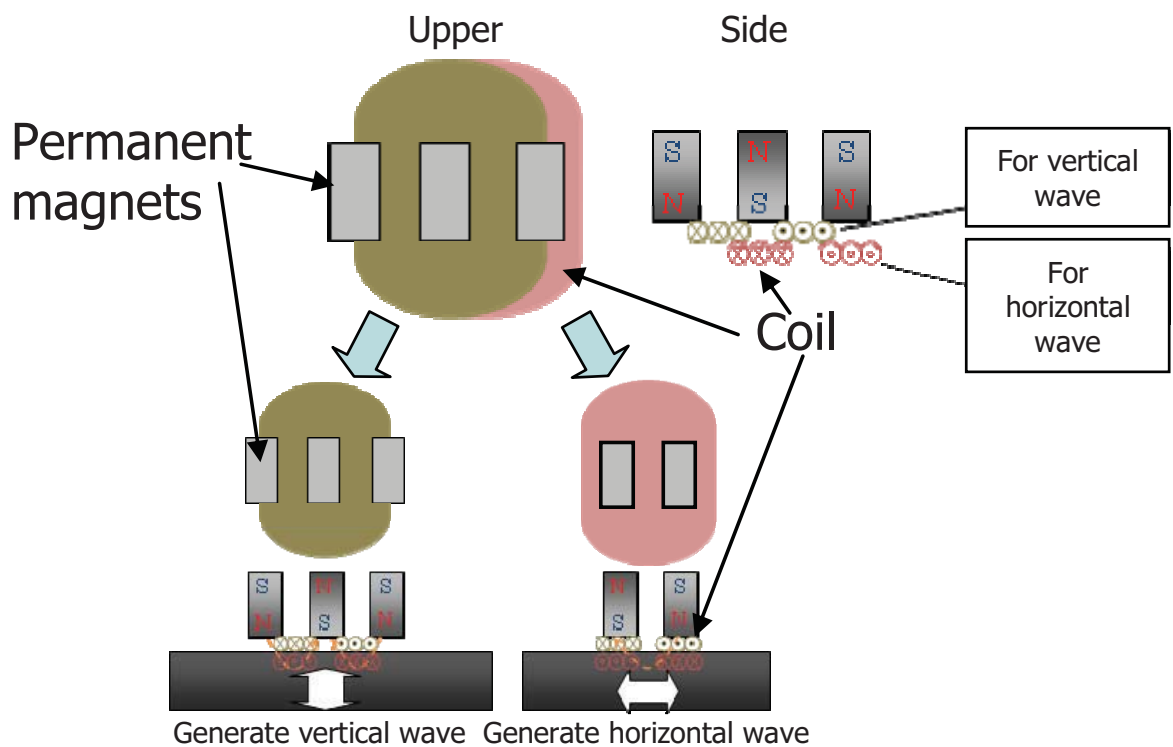


Fig.4.2.2-1 Structure of a trial EMAT sensor [T17\*]

設計に先立ち、磁石の選定を行った。磁石材質は 3.2.2 で述べた高温時に高い磁力を有する SmCo 磁石を用いるが、第 3 章では高温測定時に磁石内反射による反射波がノイズとなったことから磁石サイズを 3 種類用いて、磁石内反射の少ない磁石を選定した。評価は、底面からの 2 回目の多重反射(B2 エコー)を用いて行った。

表 4.2.2-1 は各磁石を用いて B2 エコーを評価したものである。常温でも磁石からの反射波が検出された「B」と「C」の磁石は不採用である。よって、「A」磁石を採用した。

表 4.2.2-2 は、B2 エコーを確認した際の超音波発信条件である。

**Table4.2.2-1 Magnet size and B2 echo from a 10mm thick plate**

No.	L	W	H	Surface flux density (T)	B2 echo amplitude (V)	Magnet signal
A	6.5	12	10	0.334	0.043	No
B	11	14	8	0.343	0.038	Yes
C	20	10	20	0.418	0.075	Tes

**Table4.2.2-2 Test condition for selected magnet**

RAM- 10000	Frequency	2MHz	Filter (NF FV-628B)	High pass	1.5MHz
	Burst No.	2		Low pass	2.5MHz
	Pre-amplifier Gain	30dB	Oscilloscope (Lecroy)	Averaging	100
	Mail amplifier Gain	40dB		Sampling time	2Gs/s

次にコイルの選定を行う。コイルは、線径、巻き数、形状の異なる 6 種類を用意し、「A」の磁石を用いて評価を行った。用意した 6 種類のコイルを表 4.2.2-3 に示す。このときの超音波の発信条件を表 4.2.2-4 に示す。

励磁周波数は、第 3 章で用いた 2MHz を中心に  $\pm 0.5\text{MHz}$  の周波数で調査した。

図 4.2.2-3 と 4.2.2-4 は、それぞれのコイルタイプでの受信波形である。判断基準は、受信感度、多重反射を識別する分解能、ノイズ、不感帯の 4 つである。コイル 1、2 は受信感度が低く信号対ノイズ比がよくないので不採用である。コイル 5、6 は、受信感度は高いがノイズが大きく、多重反射を識別する分解能が良くないので不採用である。コイル 3、4 は、多重反射を識別する分解能もノイズも低く、不感帯も少ないがコイル 4 はコイル 3 に比べ相対的に受信感度が低い。よって、採用するコイル形状は、コイル 3 を選択した。励磁周波数は、ノイズの小さな 2MHz を採用した。

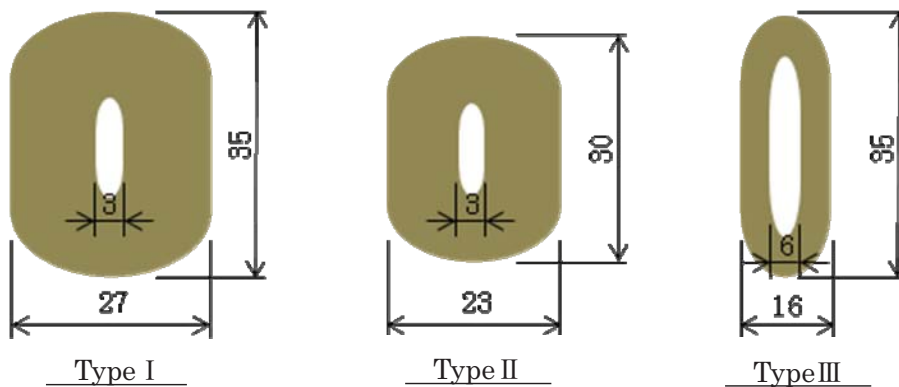
ハイブリッドセンシング用 EMAT は、ここまで述べた設計概念、磁石形状、コイル形状を選択し試作した。

**Table4.2.2-3 Coil parameters**

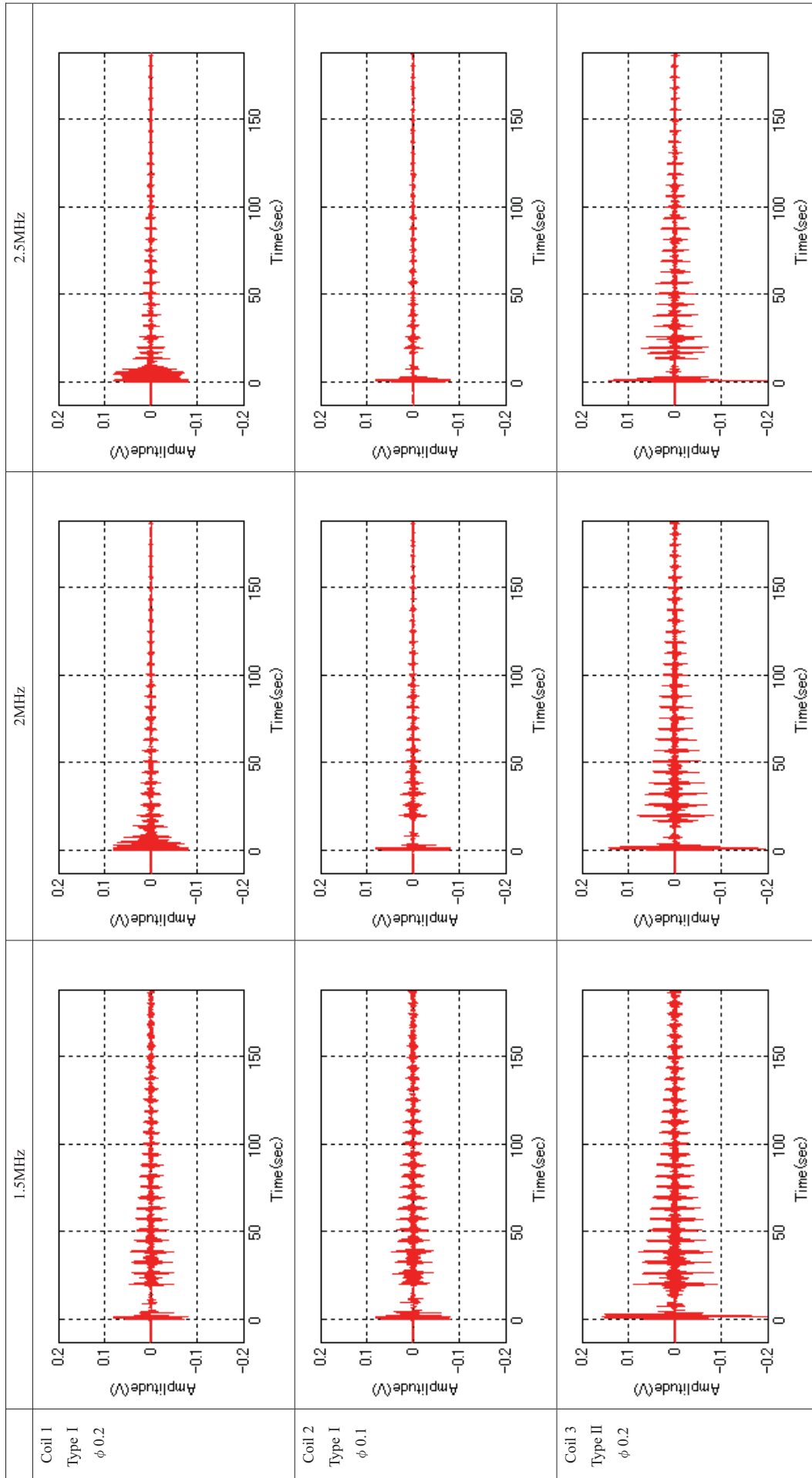
No.	Diameter (mm)	Turn No.	Type
1	φ 0.2	51	I
2	φ 0.1	84	I
3	φ 0.2	44	II
4	φ 0.1	79	II
5	φ 0.2	23	III
6	φ 0.1	41	III

**Table4.2.2-4 Test conditions for the selected magnet**

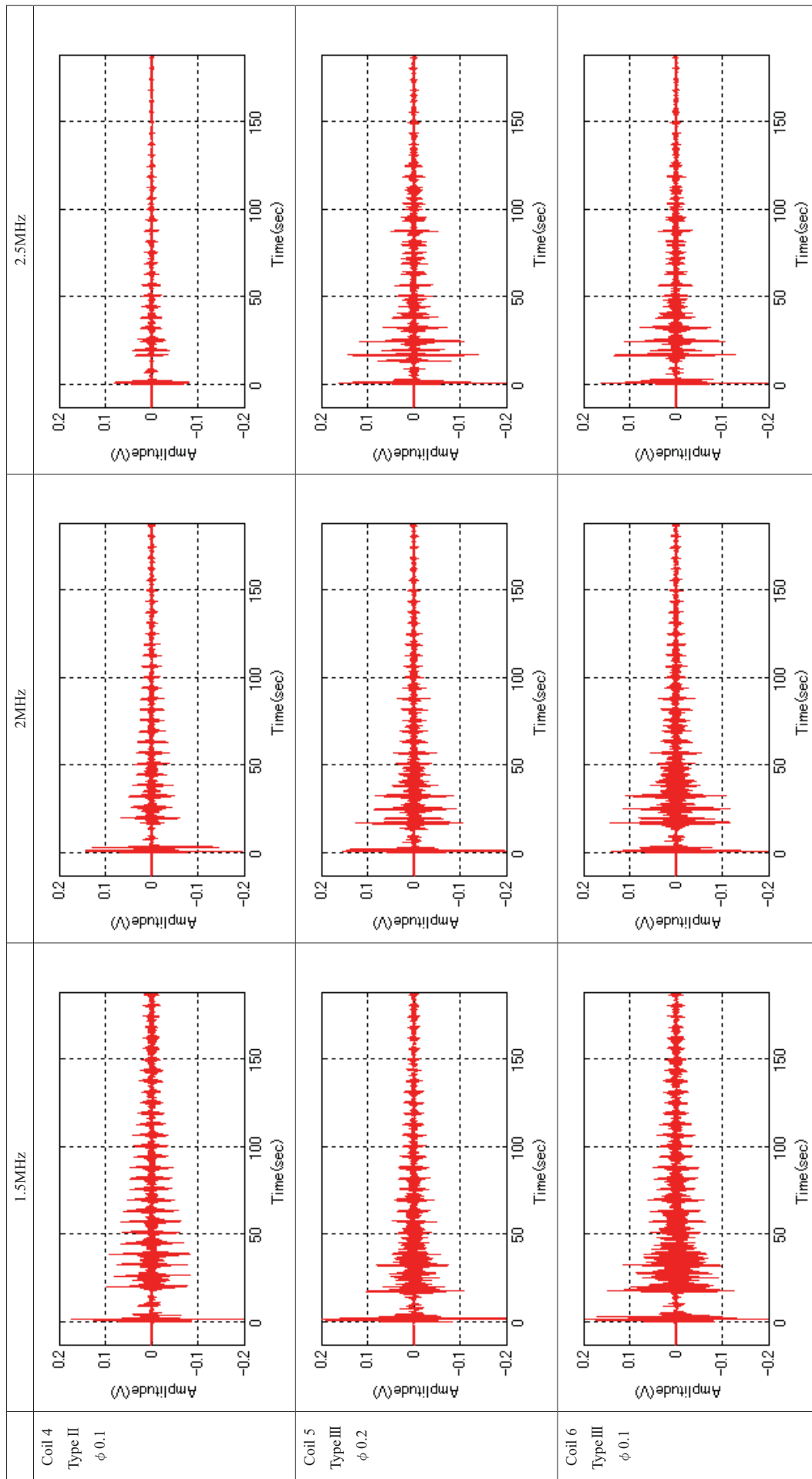
RAM-10000	Frequency	1.5, 2.0, 2.5 MHz	Filter (NF FV-628B)	High pass	1.0-2.5MHz
	Burst No.	2		Low pass	2.0-3.5MHz
	Pre-amplifier Gain	40dB	Oscilloscope (Lecroy)	Averaging	100
	Mail amplifier Gain	50dB		Sampling time	1Gs/s



**Fig.4.2.2-2 Type of the coil [T17\*]**



**Fig.4.2.2-3 Results of received waveforms for coil type selection**



**Fig.4.2.2-4 Results of received waveforms for coil type selection**

### 4.3 試験方法

#### 4.3.1 測定システム

ハイブリッドセンシングとして用いる測定システムを図 4.3.1-1 に示す。EMAT を配管に対し対向する位置に設置する。超音波の送受信はスイッチにより切り替える。また、コイルの直流抵抗が測定できるオームメータを別途取り付ける。超音波はバースト波発生装置を用い、プリアンプ、オシロスコープ、信号処理用 PC のシステム構成となる。

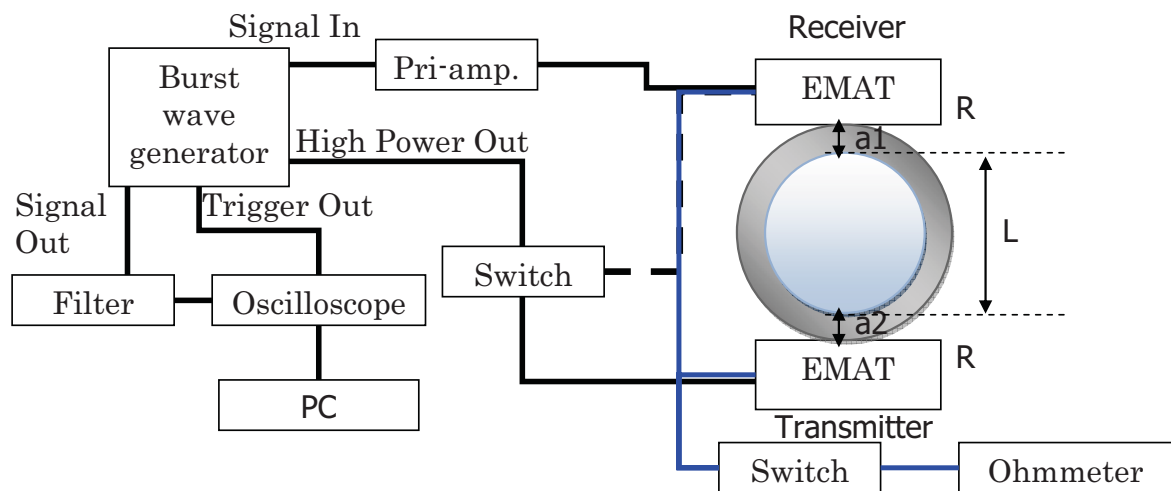


Fig.4.3.1-1 Measurement system using a hybrid sensing [T17\*]



### 4.3.2 測定フロー

従来のハイブリッドセンシングを行わない場合、EMAT とは別に、温度計を別途取り付ける必要があった。ハイブリッドセンシング EMAT では、EMAT 構造材であるコイルの直流抵抗を測定することで、配管表面温度を測定し、その温度を用いて配管内の音速を決定する。決定した音速を用いて減肉量を評価する。評価した減肉量を使って配管内径を求める。対向する EMAT に超音波を受信させることで超音波が水中伝播した時間を測定し、水中の超音波音速を求める。超音波音速は温度に依存して変化することから、超音波音速から水温を求めることができる。これら一連の測定フローを図 4.3.2-1 に示す。

温度計、減肉計、水温計が同位置に存在することで、従来のように別々にセンサを配置したときに比べ、場所に依存した誤差はなくなる。そのため、測定精度は相対的に高くなる。

配管表面温度、減肉量、水温測定は、図 4.3.1-1 の一部を抜き出した試験体系を用いて、それぞれ個別に試験を行った。

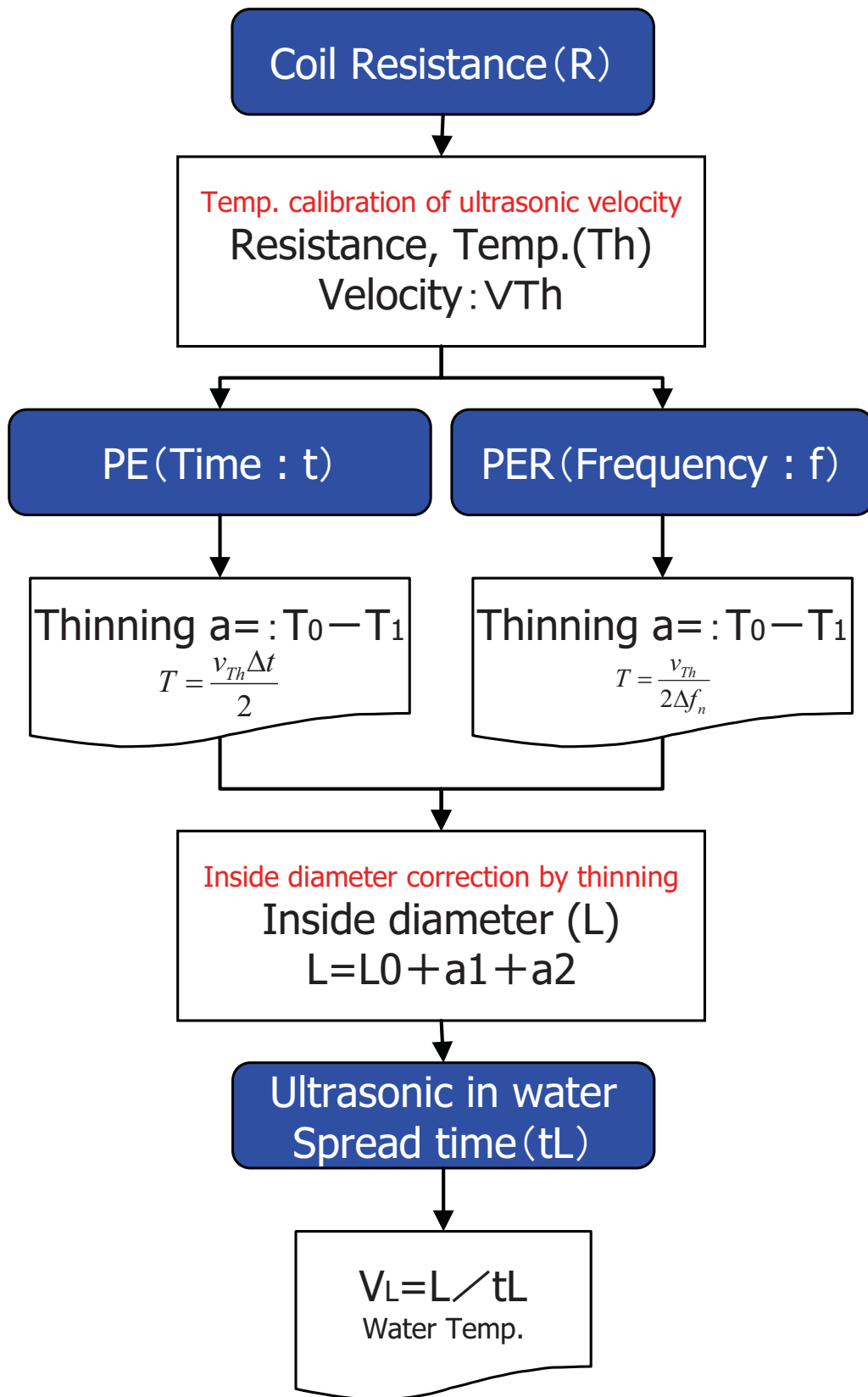


Fig. 4.3.2-1 Measurement flow for hybrid system [T17\*]

## 4.4 試験結果

### 4.4.1 コイルの直流抵抗測定

EMAT と校正された熱電対を図 4.4.1-1 に示すように配置し、試験体をヒータで常温から 200℃まで加熱し、デジタルマルチメータにより直流抵抗値を測定した。

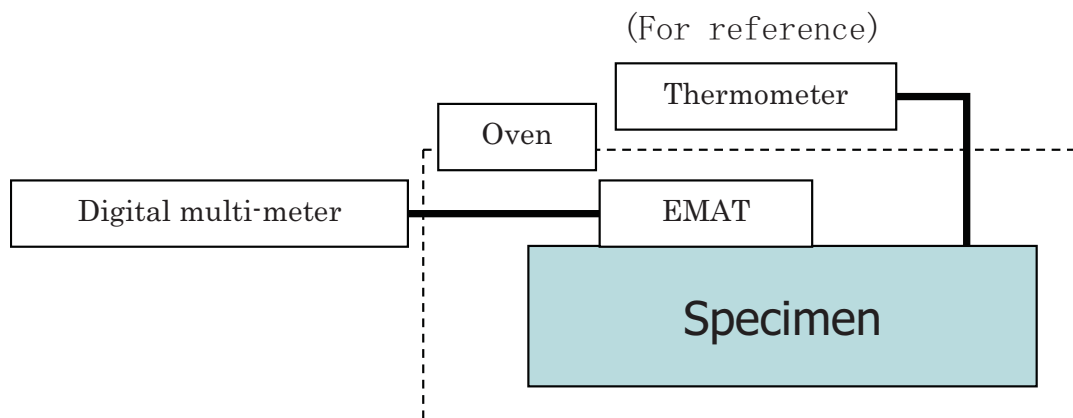
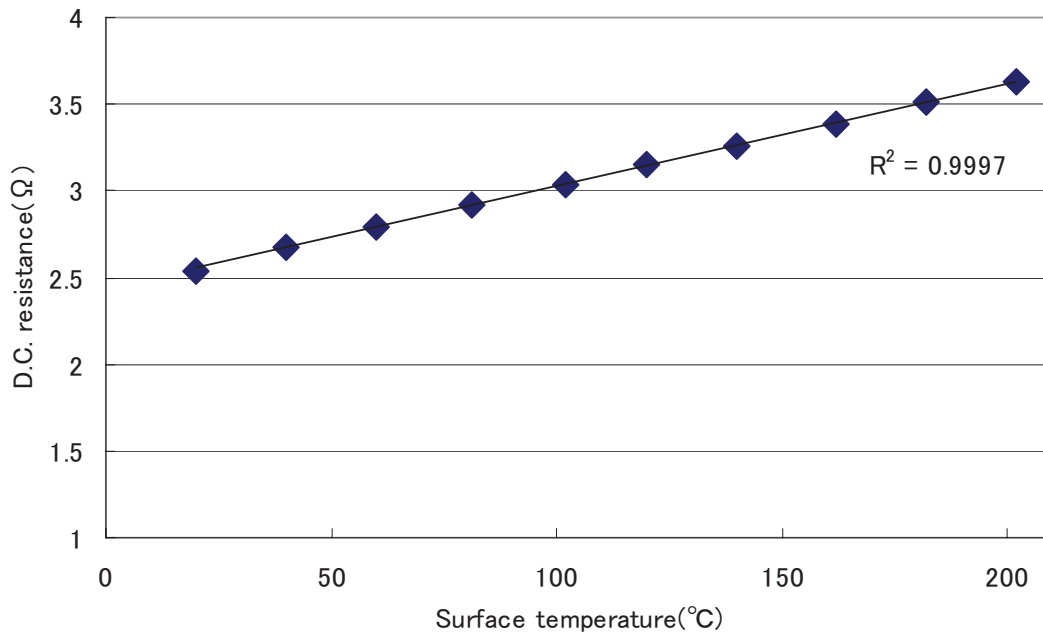


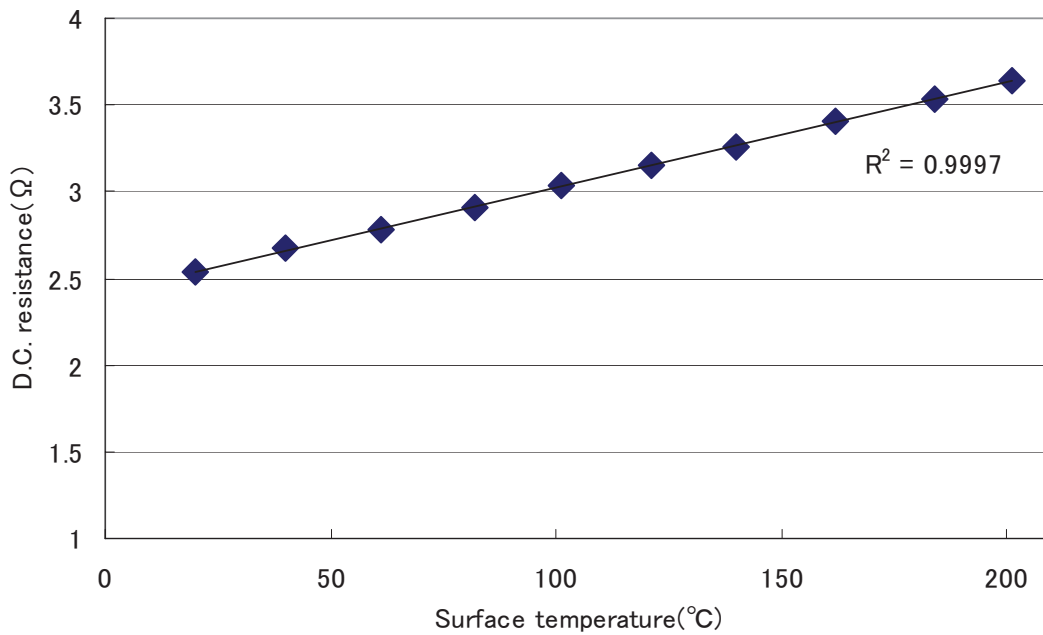
Fig.4.4.1-1 Measurement system for D.C. resistance of coil [T17\*]

図 4.4.1-2 から 4.4.1-5 は、試験体温度が 20℃から 200℃で板厚が 2 mm、5mm、10 mm、15 mm の場合のコイルの直流抵抗値である。測定はそれぞれ 4 回ずつ行っており、全てプロットしている。図 4.4.1-6 は全ての板厚を同時にプロットしたものである。これらより、板厚に依存することなく温度とコイルの直流抵抗の値は比例関係にあることが確認できる。ここで、最小二乗法により関数  $y(x)$  ( $y$ : コイルの直流抵抗,  $x$ : 温度) を求めた。また、総変動に対する予測値による変動の比を決定係数  $R^2$  とした場合、式 4.4.1-1 より 0.9993 以上で一致しているため、再現性も十分確保できたと考える。ここで、 $\hat{y}$  は推定値、 $\bar{y}$  は平均値である。

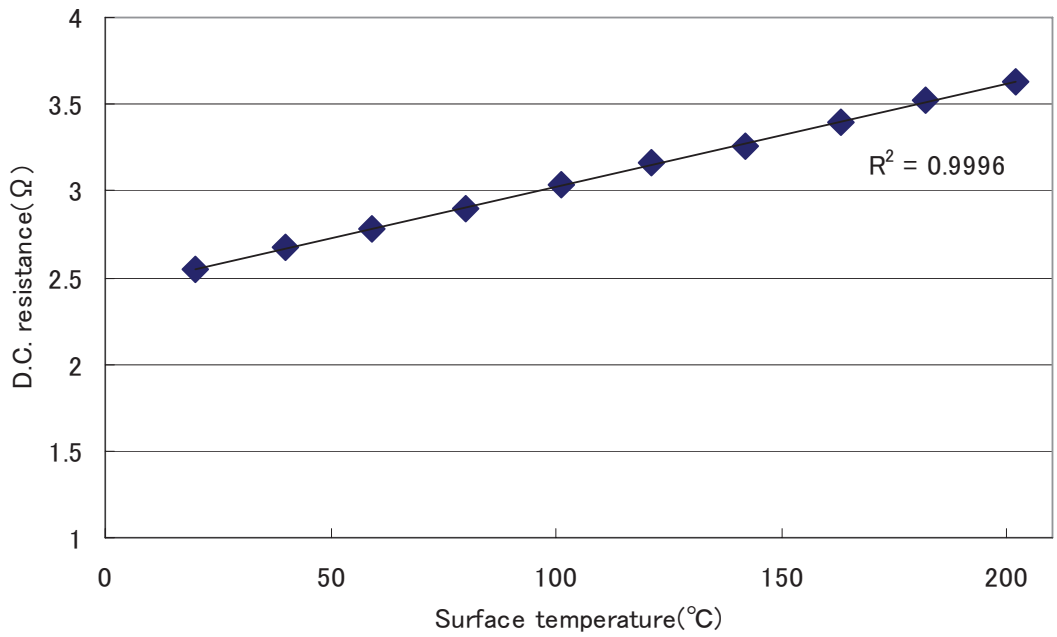
$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.4.1-1)$$



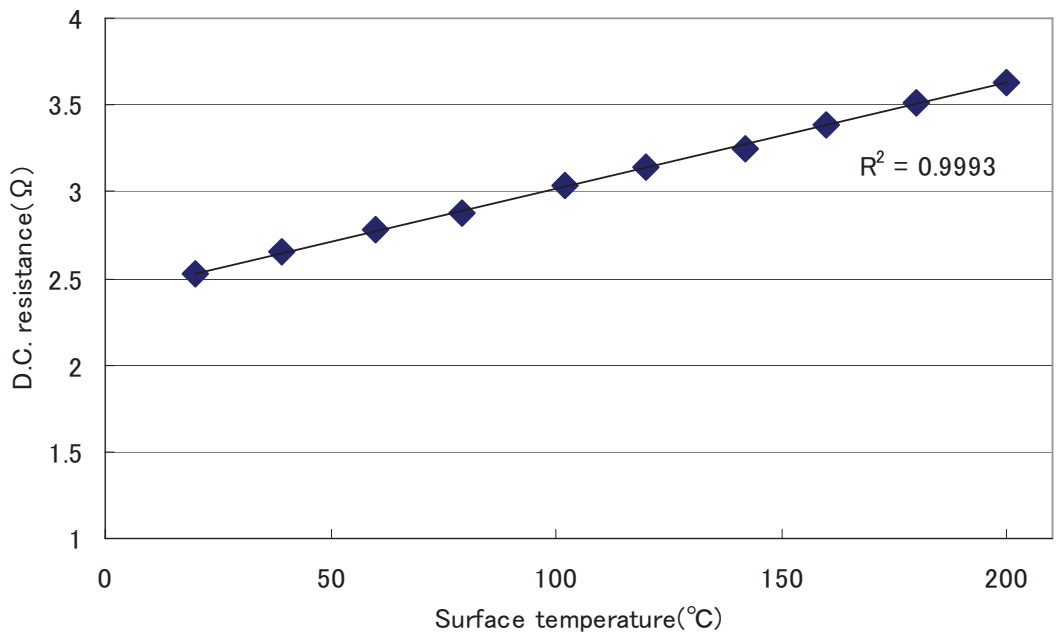
**Fig.4.4.1-2 Relationship between the coil DC resistance and temperature (from 20 degree C to about 200 degree C, Board thickness 2mm)**



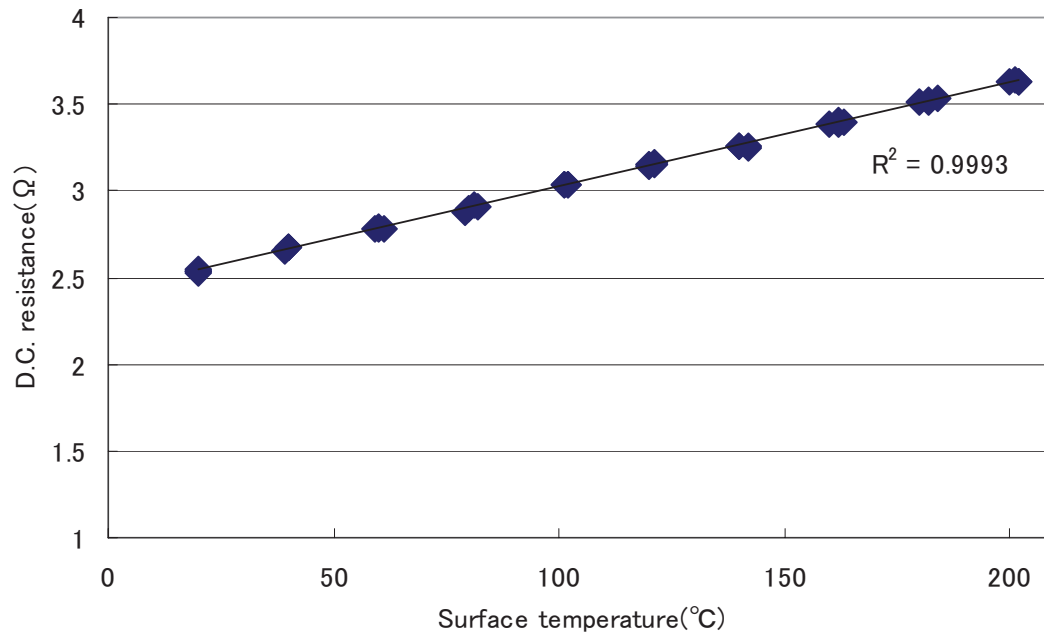
**Fig.4.4.1-3 Relationship between the coil DC resistance and temperature (from 20 degree C to about 200 degree C, Board thickness 5mm)**



**Fig.4.4.1-4 Relationship between the coil DC resistance and temperature (from 20 degree C to about 200 degree C, Board thickness 10mm)**



**Fig.4.4.1-5 Relationship between the coil DC resistance and temperature (from 20 degree C to about 200 degree C, Board thickness 15mm)**



**Fig.4.4.1-6 Relationship between the coil DC resistance and temperature (from 20 degree C to about 200 degree C, Board thickness 2, 5, 10, 15mm) [T17\*]**

#### 4.4.2 減肉測定

減肉モニタリングについては、第3章でも検証しているが、本章で試作した EMAT でも再度測定した。超音波発信条件を表 4.4.2-1 に示す。表 4.4.2-2 は板厚測定量を PE 法、PER 法で測定した結果である。図 4.4.2-1 から 4.4.2-4 は測定した受信波形とその FFT である。PE 法は 2mm の板厚測定はできず、140°C以上の温度でも測定が困難な場合があることがわかった。PER 法では、2 mm の測定は可能であったが、温度については、PE 法同様であった。なお、この測定に第3章で用いた磁石からの反射波を打ち消すノイズカットフィルタは用いていないが、磁石からの反射波を構造上抑えなければならない。そこで、センサの改良を行った。4.2.2 で選定した磁石では磁石内反射は発生しないことから磁石はそのまま利用し、コイルを図 4.4.2-5 に示すように磁石と磁石の間に巻いた。縦波用のコイルはそのままとするので、改良したハイブリッドセンシング用 EMAT は、図 4.4.2-10 のようになる。

ここで、表 4.4.2-3 は、改良した EMAT を用いて板厚測定した結果をまとめたものである。図 4.4.2-6 から 4.4.2-9 に受信波形と FFT を示す。改良前に比べ磁石ノイズカットフィルタがなくとも多重反射を識別できた。第3章の測定結果と比較すると、第3章の PER 法での測定精度は  $2 \pm 0.1$  mm であったことに対し、本章の PER 法では  $2 \pm 0.03$  mm 以下となり、ノイズカットフィルタを使わなくとも測定精度の向上を確認できた。

**Table4.4.2-1 Test conditions for the selected magnet**

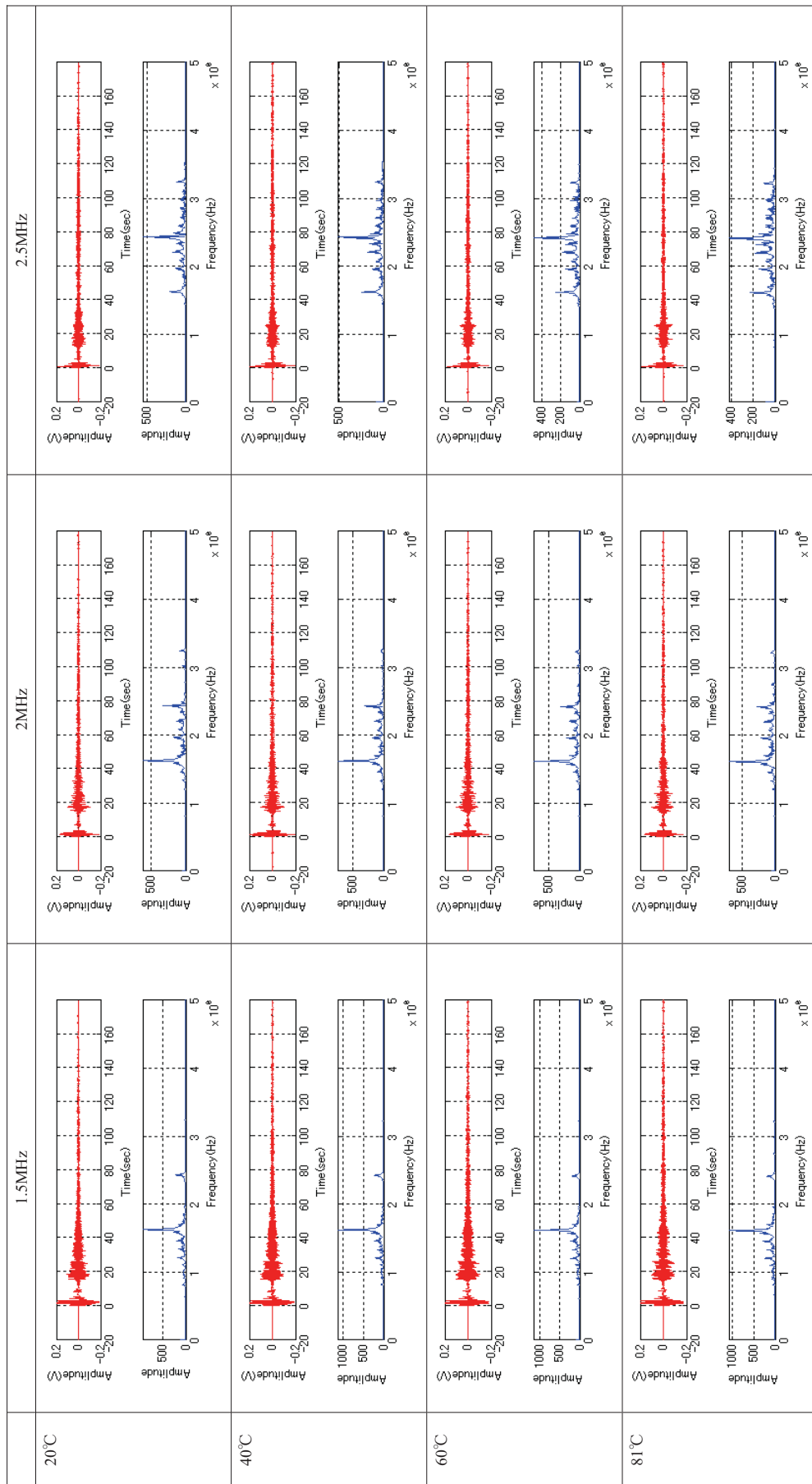
RAM-10000	Frequency	1.5, 2.0, 2.5 MHz	Filter (NF FV-628B)	High pass	1.0-2.5MHz
	Burst No.	2		Low pass	2.0-3.5MHz
	Pre-amplifier Gain	40dB	Oscilloscope (Lecroy)	Averaging	100
	Mail amplifier Gain	50dB		Sampling time	1Gs/s



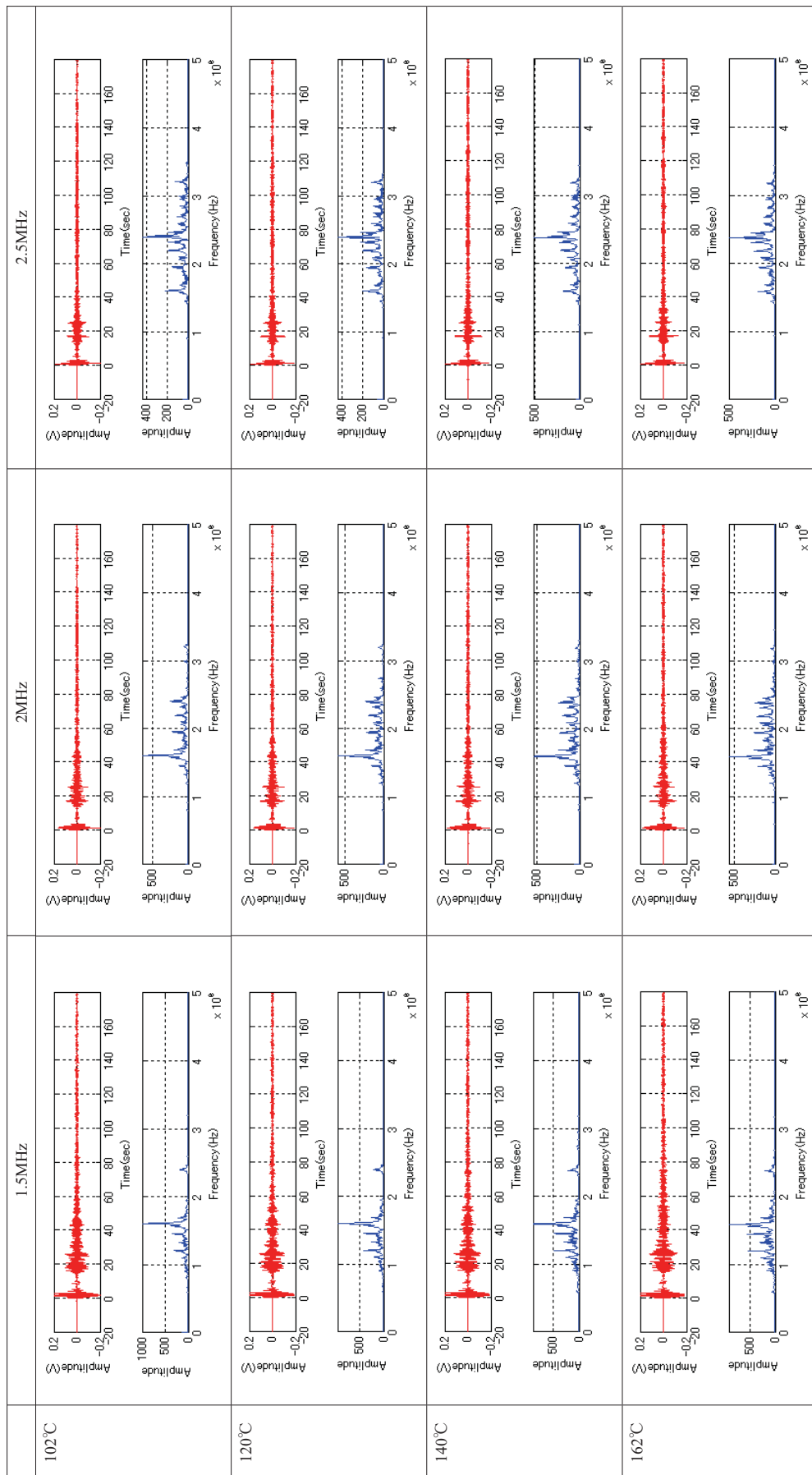
**Table4.4.2-2 Results of Measurement of board thickness test**

Freq. : 2.0MHz	2mm				5mm			
	PE		PER		PE		PER	
Temp.	Thick.	Error	Thick.	Error	Thick.	Error	Thick.	Error
20	-	-	2.007	-0.007	4.998	0.002	4.993	0.007
40	-	-	2.001	-0.001	4.993	0.007	4.990	0.010
60	-	-	1.999	0.001	4.994	0.006	4.989	0.011
80	-	-	2.002	-0.002	4.993	0.007	4.988	0.012
100	-	-	2.003	-0.003	5.031	-0.031	5.003	-0.003
120	-	-	2.002	-0.002	4.992	0.008	4.988	0.012
140	-	-	2.001	-0.001	4.996	0.004	4.997	0.003
160	-	-	2.002	-0.002	4.996	0.004	4.996	0.004
180	-	-	2.005	-0.005	5.120	-0.120	5.001	-0.001
200	-	-	1.999	0.001	-	-	-	-

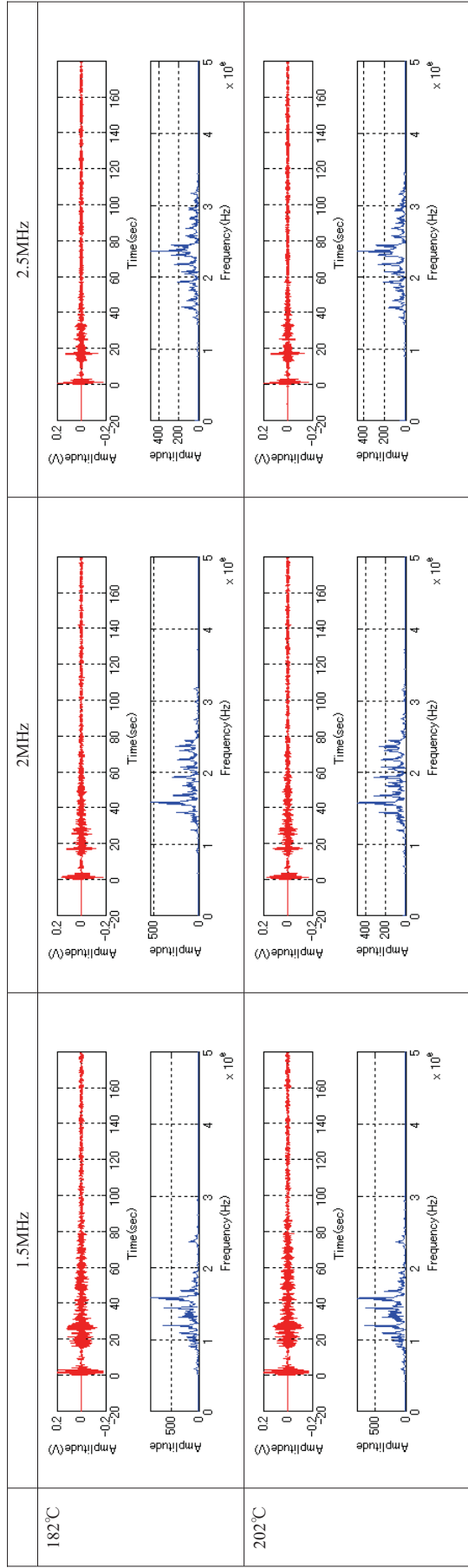
Freq. : 2.0MHz	10mm				15mm			
	PE		PER		PE		PER	
Temp.	Thick.	Error	Thick.	Error	Thick.	Error	Thick.	Error
20	9.996	0.004	9.993	0.007	15.026	-0.026	15.015	-0.015
40	9.991	0.009	9.993	0.007	15.021	-0.021	15.016	-0.016
60	9.989	0.011	9.988	0.012	15.017	-0.017	15.013	-0.013
80	9.990	0.010	10.033	-0.033	15.008	-0.008	15.015	-0.015
100	9.994	0.006	9.978	0.022	15.017	-0.017	15.280	-0.280
120	10.001	-0.001	9.974	0.026	14.914	0.086	15.014	-0.014
140	9.988	0.012	9.983	0.017	14.953	0.047	-	-
160	-	-	-	-	15.110	-0.110	-	-
180	-	-	-	-	15.038	-0.038	-	-
200	-	-	-	-	-	-	-	-



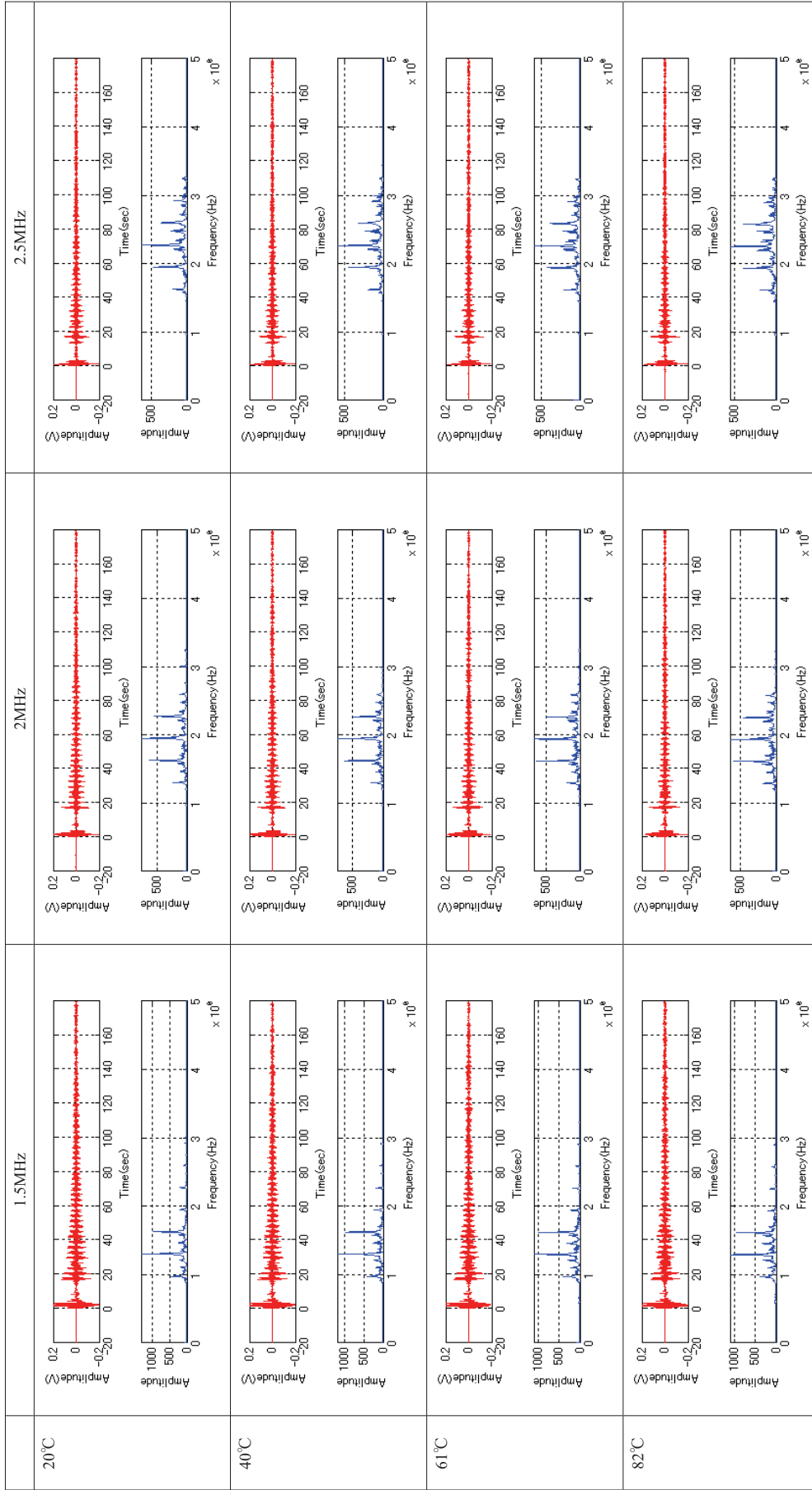
**Fig.4.4.2-1(1/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 2mm of board thickness using the trial production sensor.**



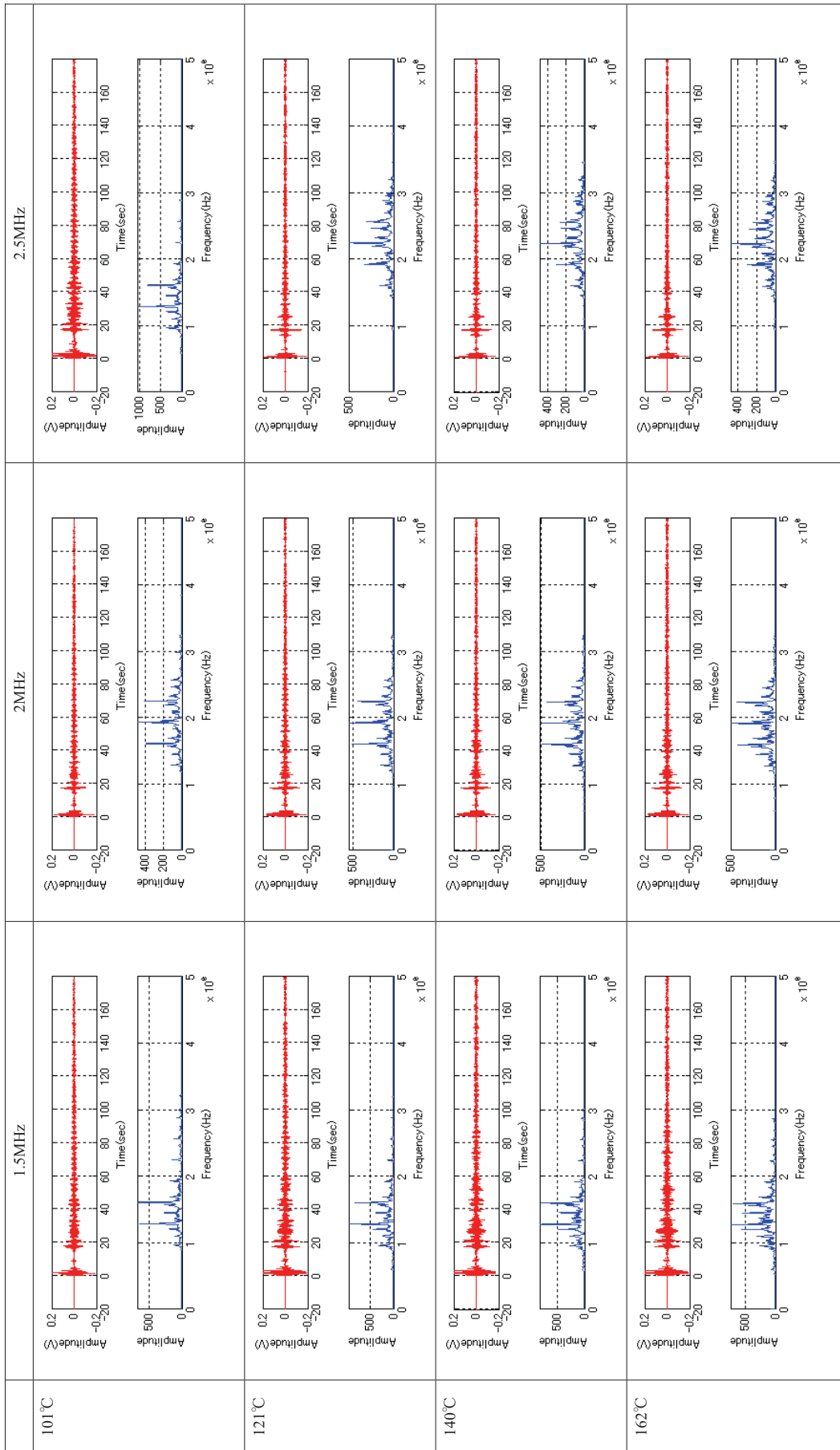
**Fig.4.4.2-1(2/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 2mm of board thickness using the trial production sensor.**



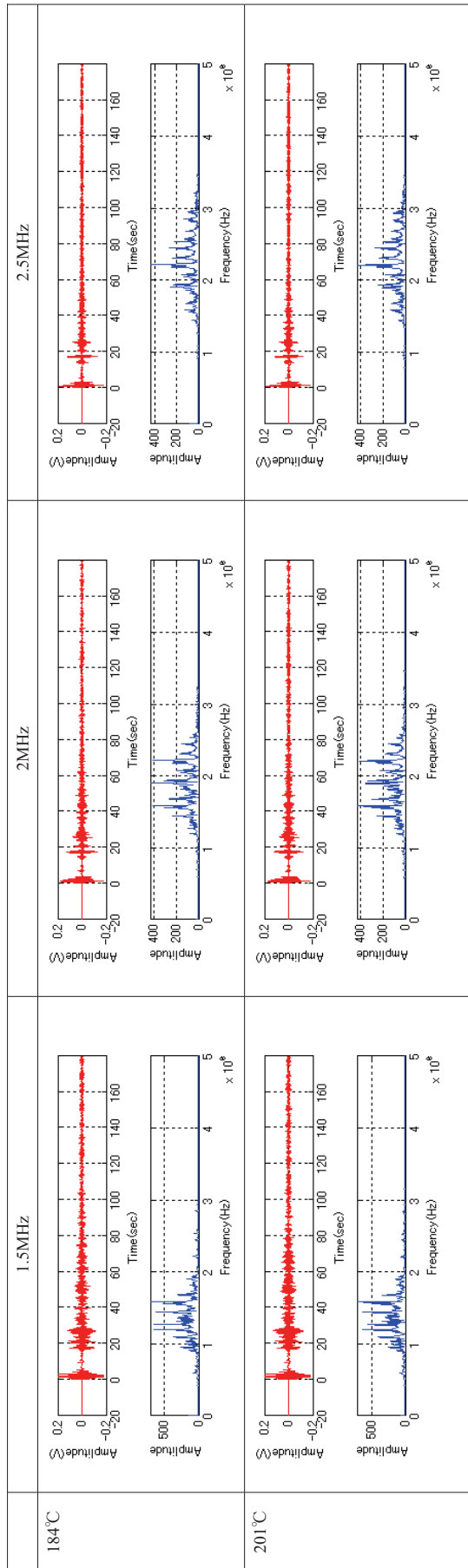
97 **Fig.4.4.2-1(3/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 2mm of board thickness using the trial production sensor.**



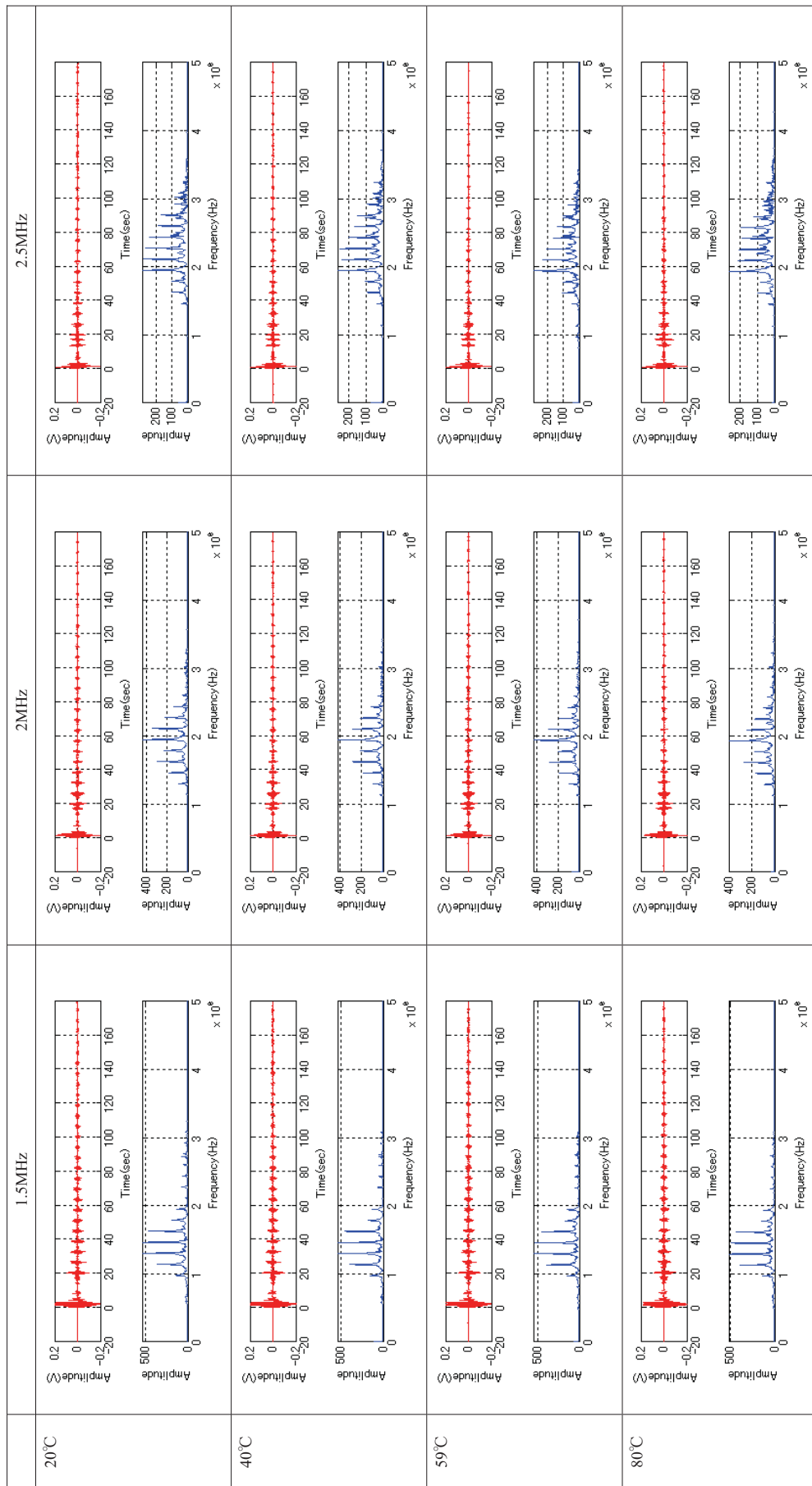
**Fig.4.4.2-2(1/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 5mm of board thickness using the trial production sensor.**



**Fig.4.4.2-2(3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 5mm of board thickness using the trial production sensor.**

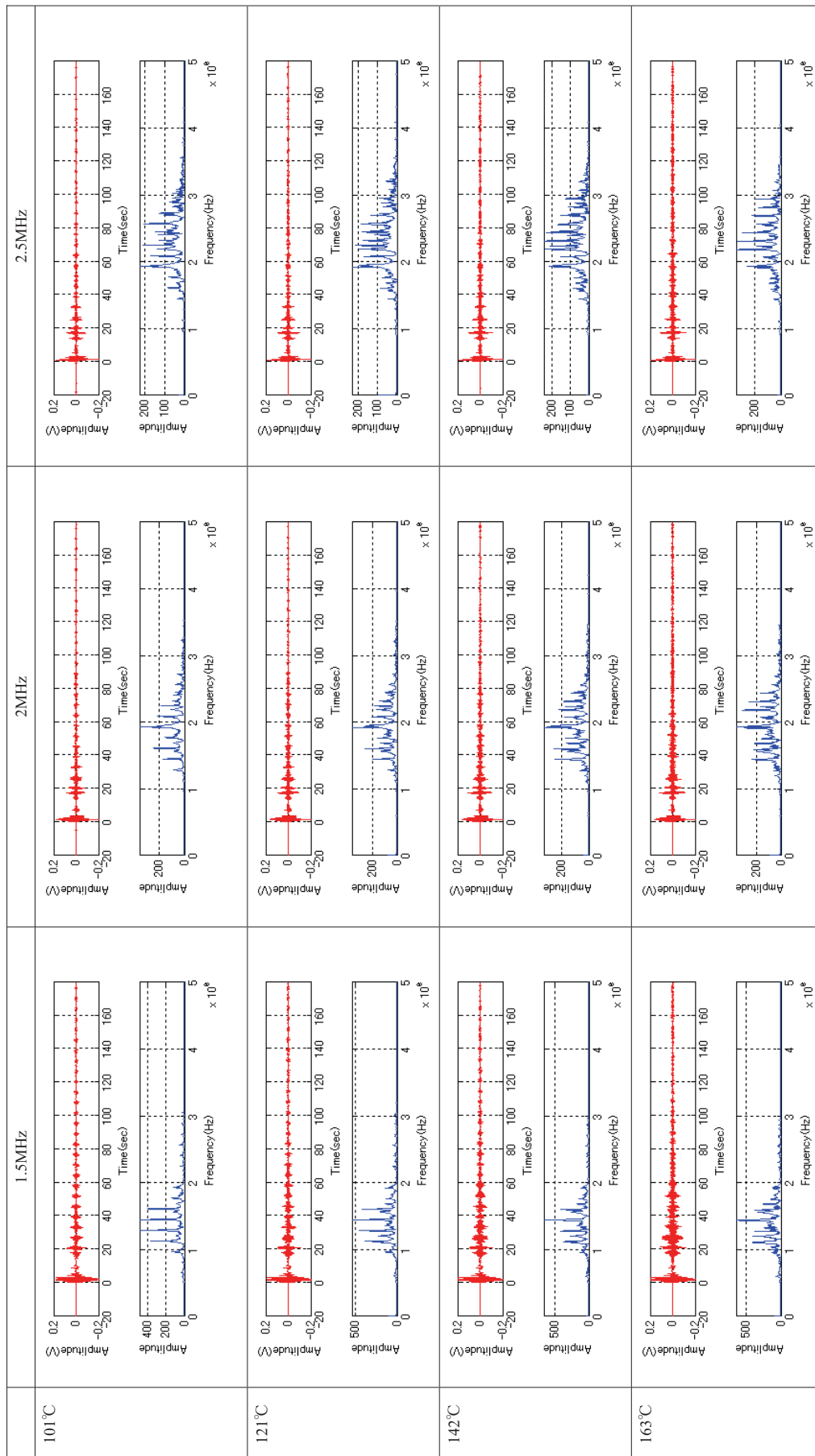


**Fig.4.4.2-2(3/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 5mm of board thickness using the trial production sensor.**

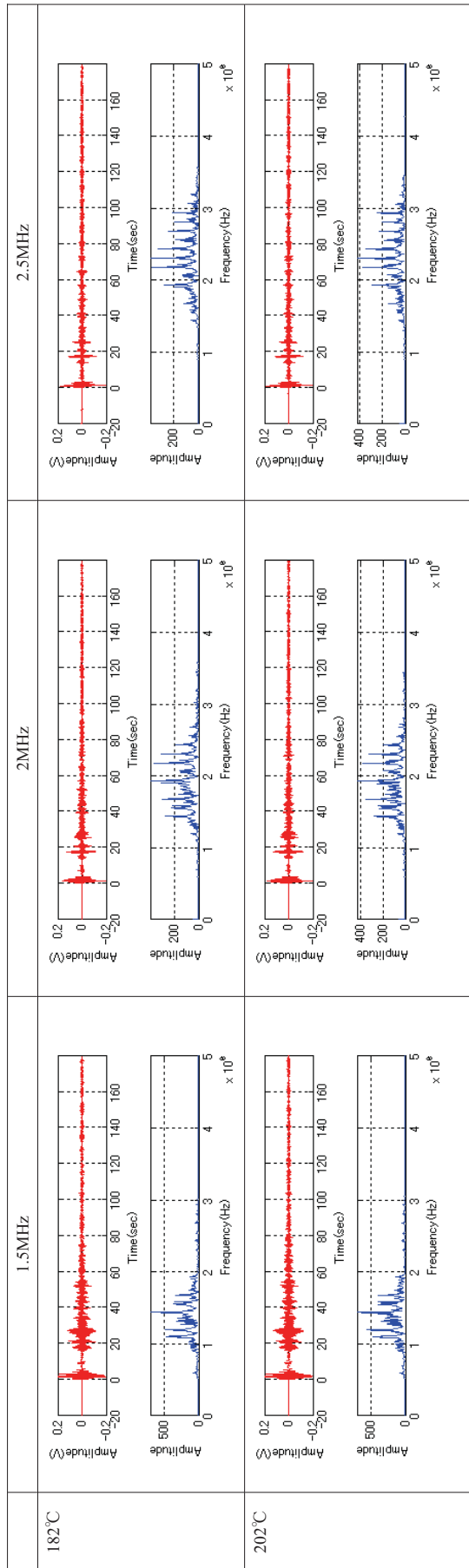


**Fig.4.4.2-3(1/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 10mm of board thickness using the trial production sensor.**

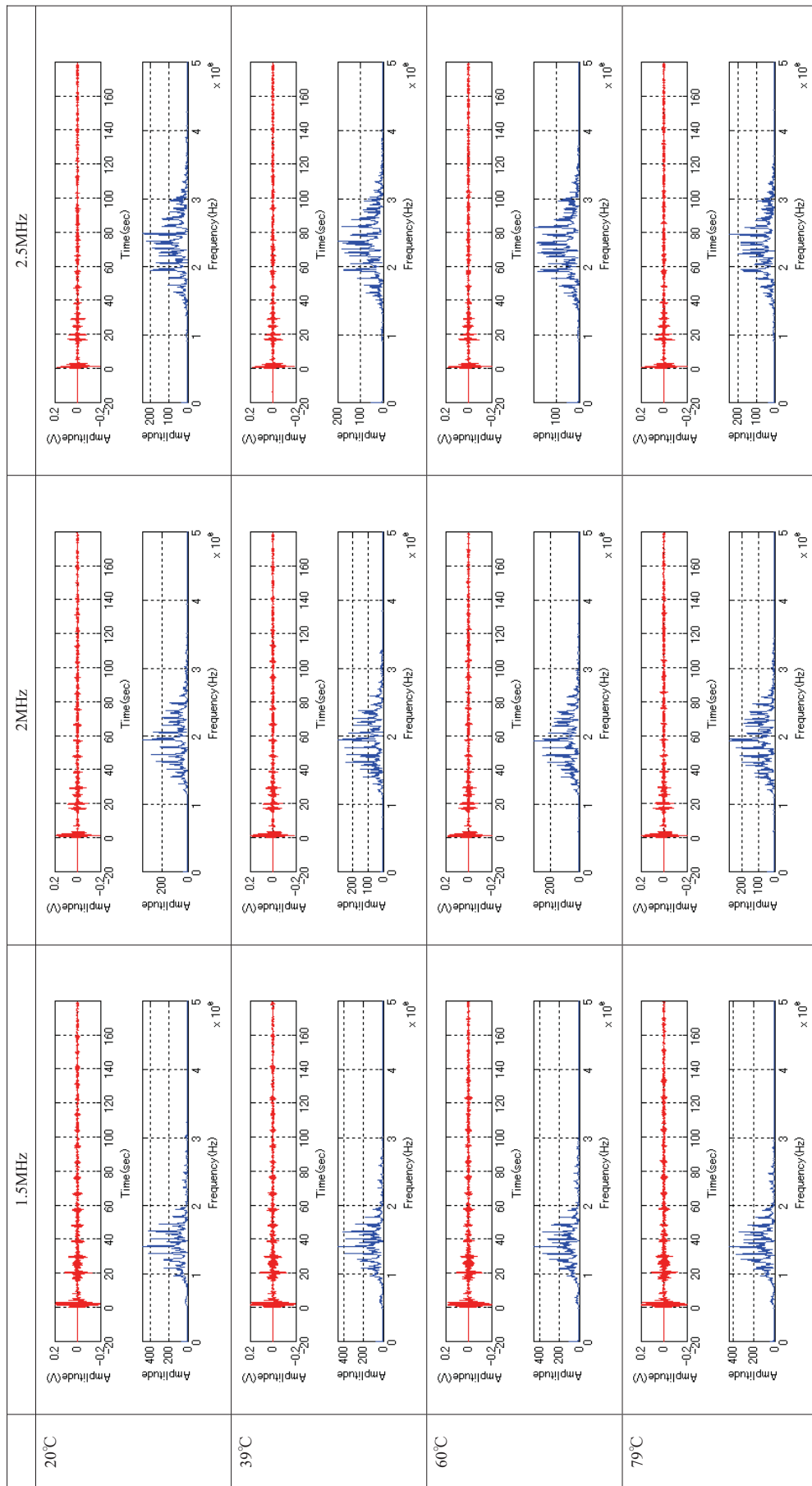




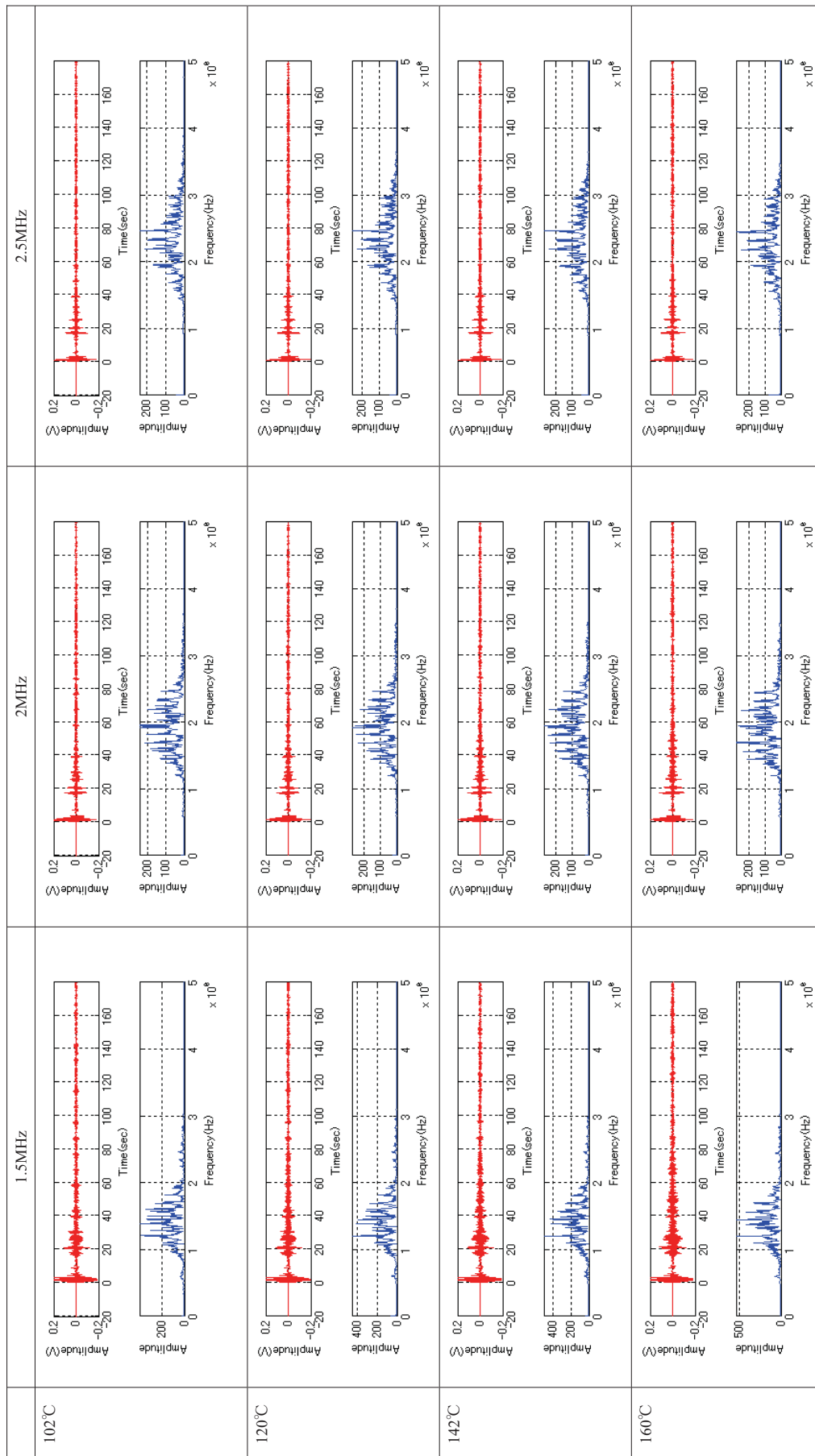
**Fig.4.4.2-3(2/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 10mm of board thickness using the trial production sensor.**



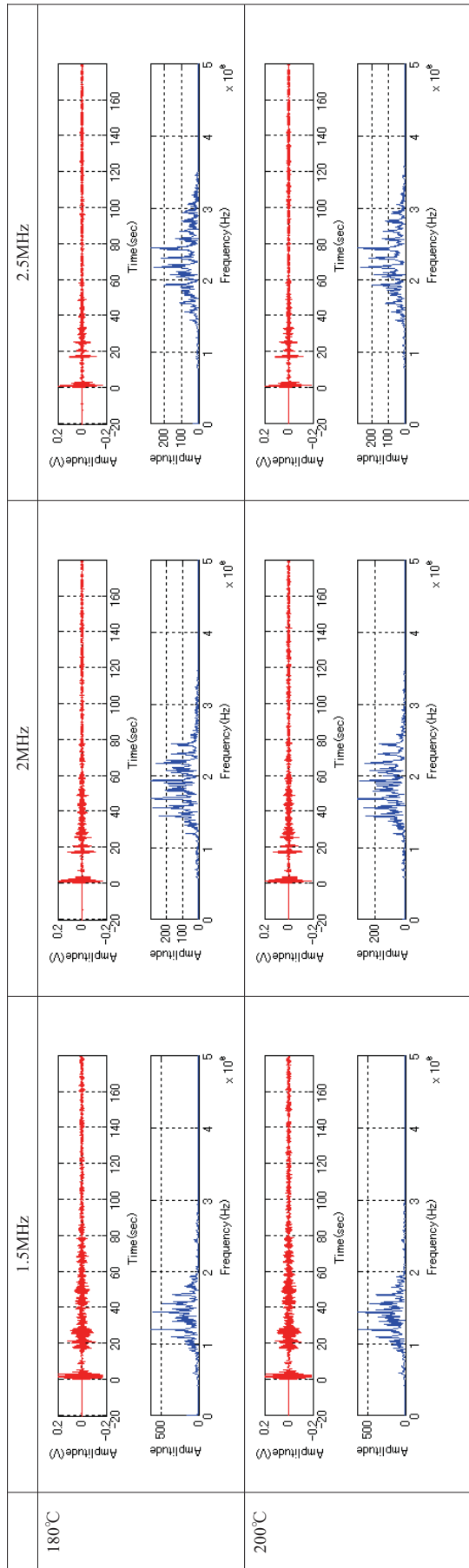
**Fig.4.4.2-3(3/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 10mm of board thickness using the trial production sensor.**



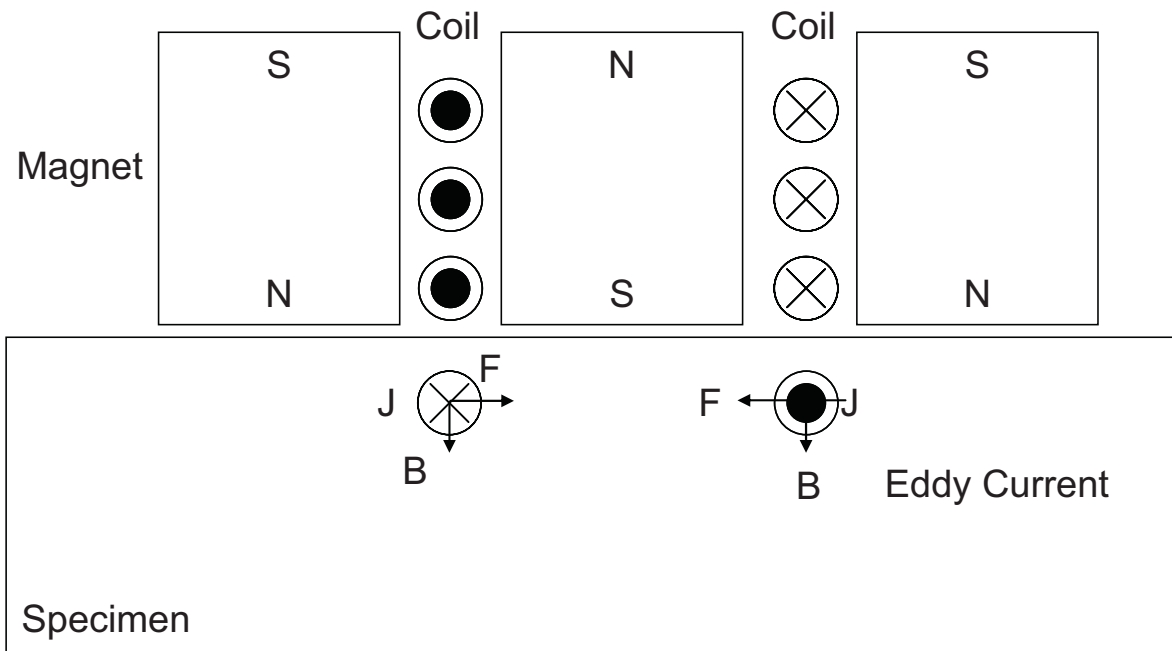
**Fig.4.4.2-4(1/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 15mm of board thickness using the trial production sensor.**



**Fig.4.4.2-4(2/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 15mm of board thickness using the trial production sensor.**



**Fig.4.4.2-4(3/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 15mm of board thickness using the trial production sensor.**

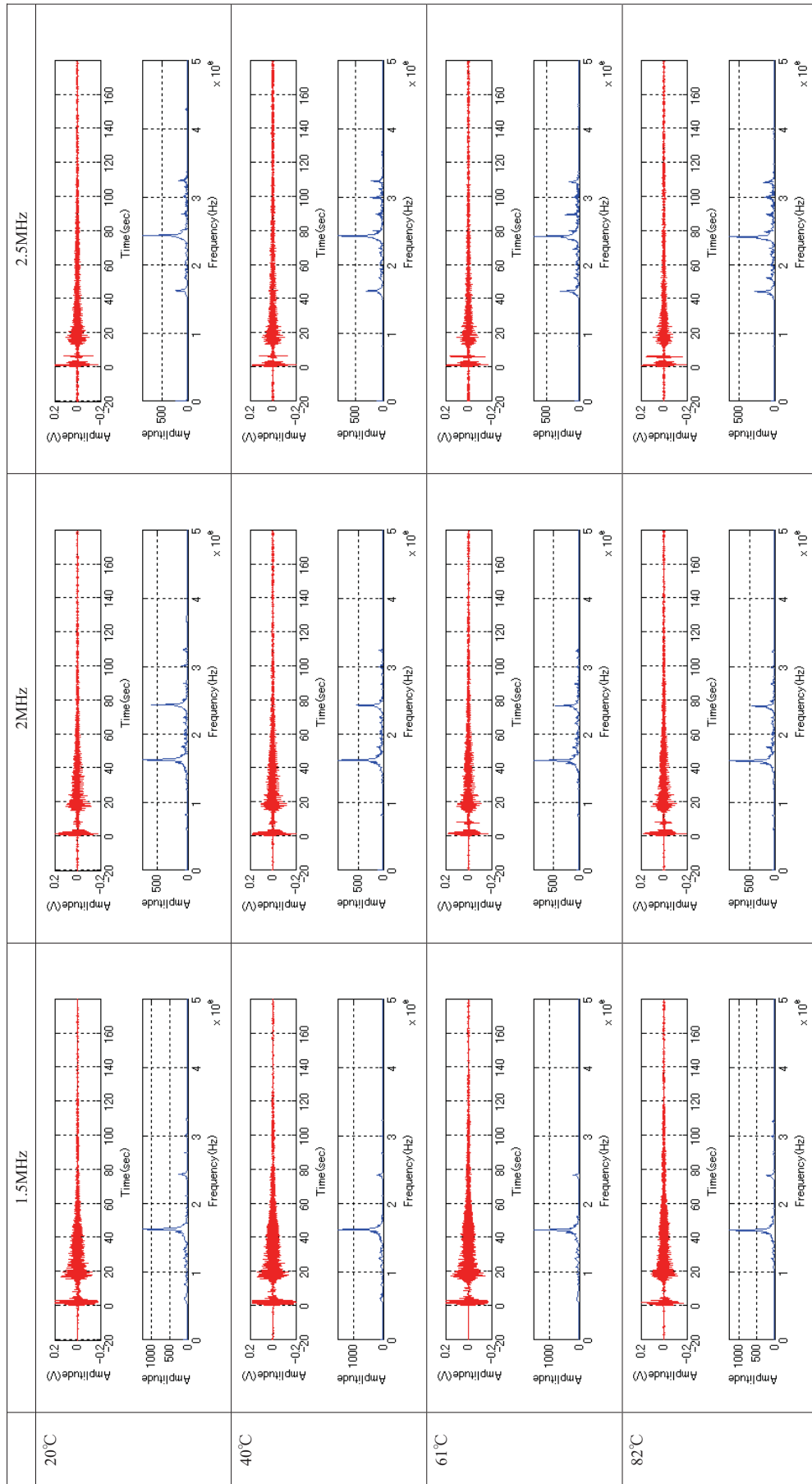


**Fig.4.4.2-5 EMAT with the above adopted coil arrangement can easily detect the magnetic flux in order to improve the detection sensitivity of pipe wall thinning measurement**

**Table4.4.2-3 Results of measurements of board thickness test using improvement in EMAT structure**

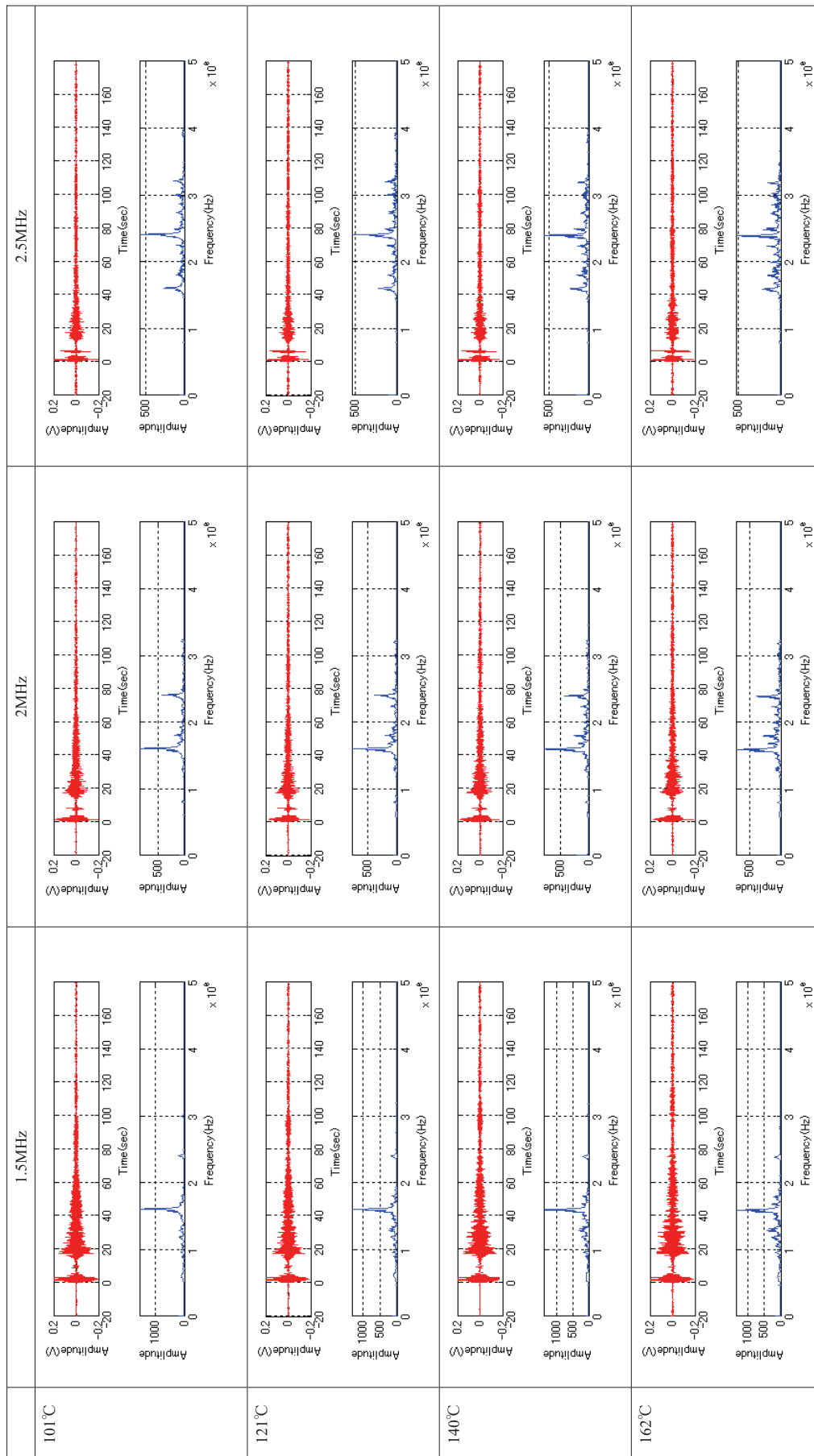
Freq. : 2.0MHz	2mm				5mm			
	PE		PER		PE		PER	
Temp.	Thick.	Error	Thick.	Error	Thick.	Error	Thick.	Error
20	-	-	2.000	0.000	5.024	-0.024	5.005	-0.005
40	-	-	1.998	0.002	5.023	-0.023	4.991	0.009
60	-	-	2.001	-0.001	4.998	0.002	5.004	-0.004
80	-	-	2.000	0.000	4.996	0.004	5.020	-0.020
100	-	-	1.999	0.001	4.993	0.007	5.002	-0.002
120	-	-	1.997	0.003	4.994	0.006	5.003	-0.003
140	-	-	1.996	0.004	5.018	-0.018	5.002	-0.002
160	-	-	1.999	0.001	4.998	0.002	5.003	-0.003
180	-	-	1.995	0.005	4.975	0.025	5.002	-0.002
200	-	-	1.996	0.004	5.004	-0.004	5.017	-0.017

Freq. : 2.0MHz	10mm				15mm			
	PE		PER		PE		PER	
Temp.	Thick.	Error	Thick.	Error	Thick.	Error	Thick.	Error
20	10.002	-0.002	9.971	0.029	15.057	-0.057	15.059	-0.059
40	9.999	0.001	9.993	0.007	15.017	-0.017	15.014	-0.014
60	10.002	-0.002	9.989	0.011	15.049	-0.049	15.015	-0.015
80	9.999	0.001	10.011	-0.011	15.046	-0.046	15.012	-0.012
100	10.021	-0.021	9.978	0.022	15.016	-0.016	15.011	-0.011
120	10.024	-0.024	9.977	0.023	14.985	0.015	15.014	-0.014
140	10.032	-0.032	9.978	0.022	15.014	-0.014	15.007	-0.007
160	9.994	0.006	10.020	-0.020	15.026	-0.026	15.054	-0.054
180	9.953	0.047	9.979	0.021	15.000	0.000	15.026	-0.026
200	9.965	0.035	9.992	0.008	14.974	0.026	15.024	-0.024

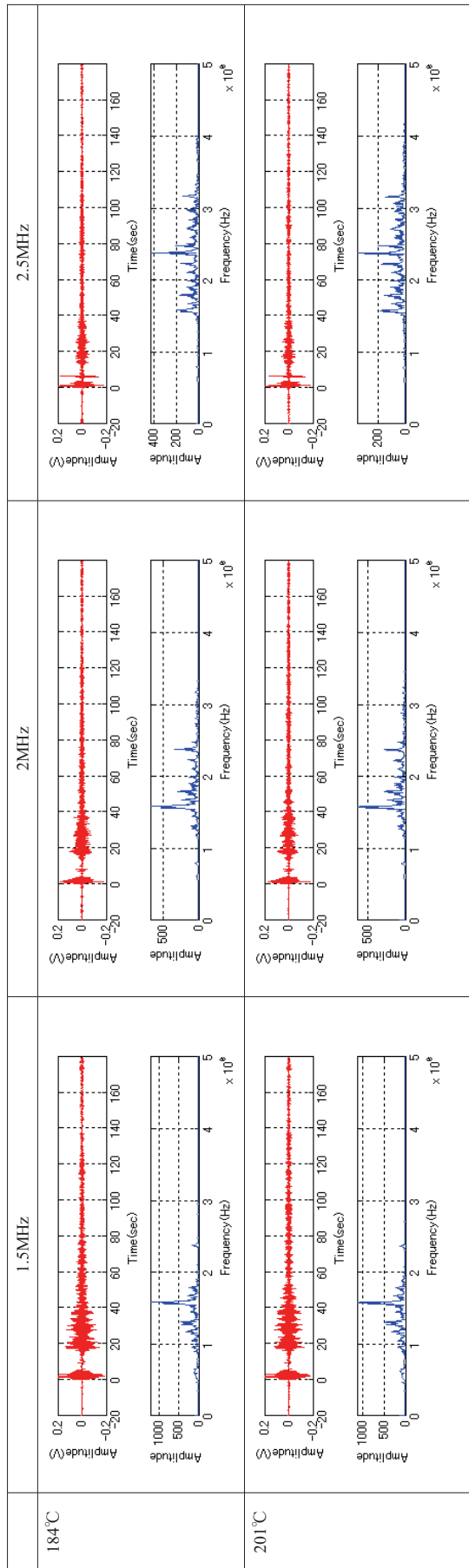


**Fig.4.4.2-6(1/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 2mm of board thickness using an improved trial production sensor.**

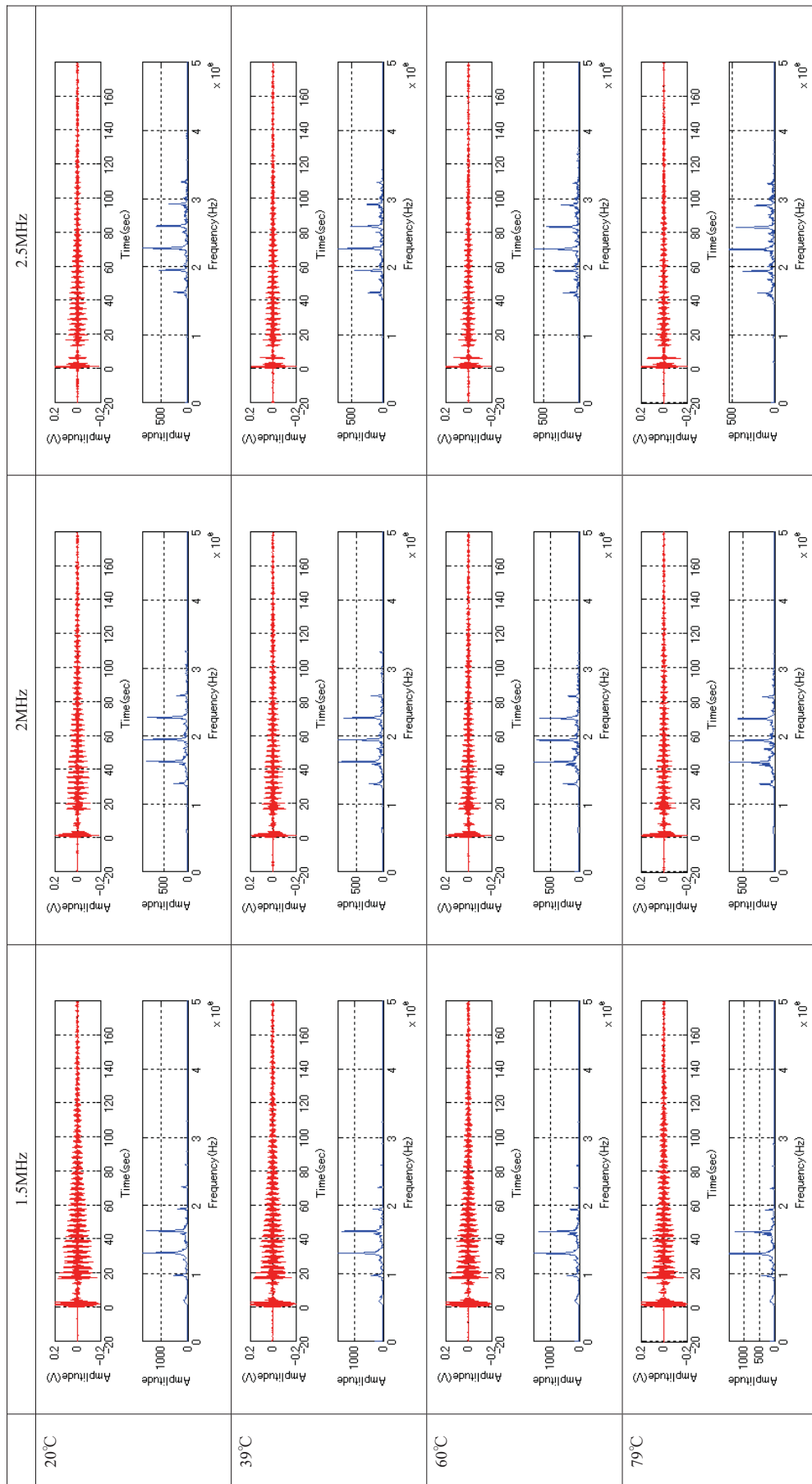




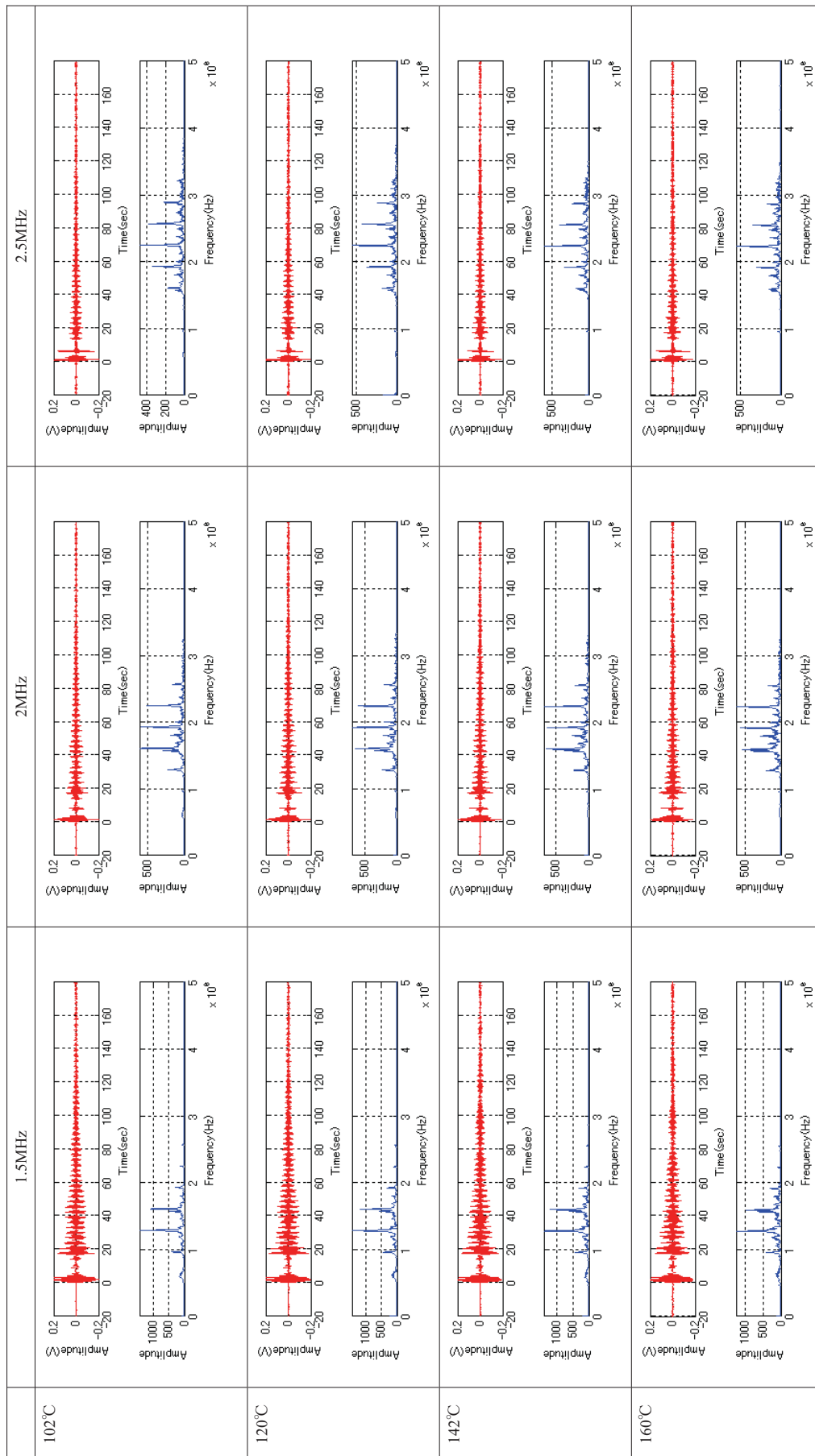
**Fig.4.4.2-6(2/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 2mm of board thickness using an improved trial production sensor.**



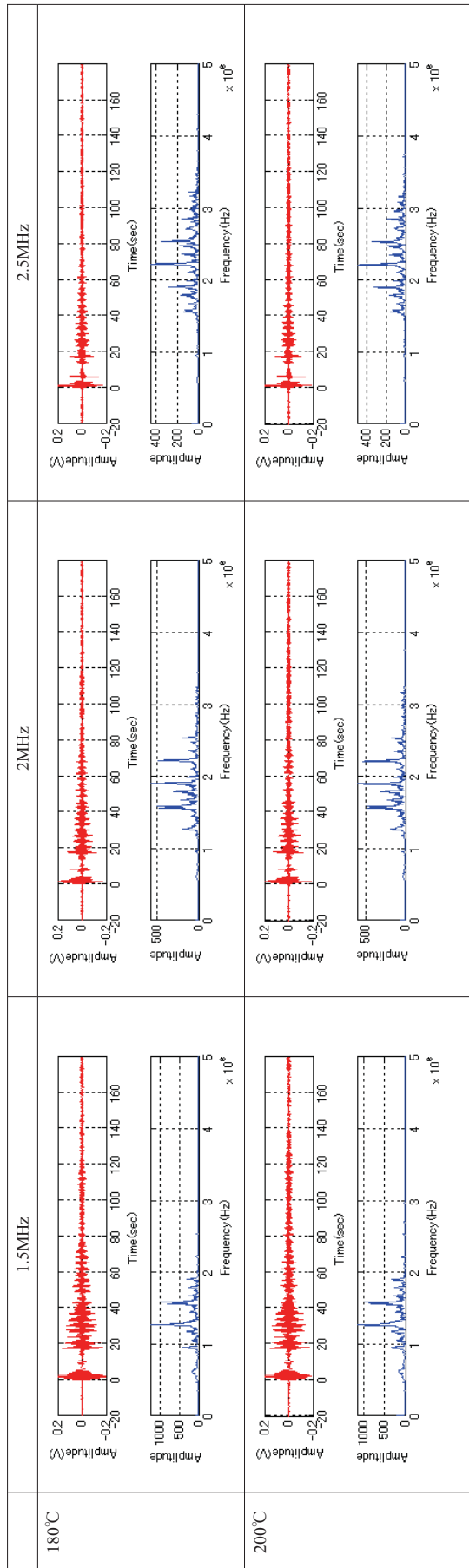
**Fig.4.4.2-6(3/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 2mm of board thickness using an improved trial production sensor.**



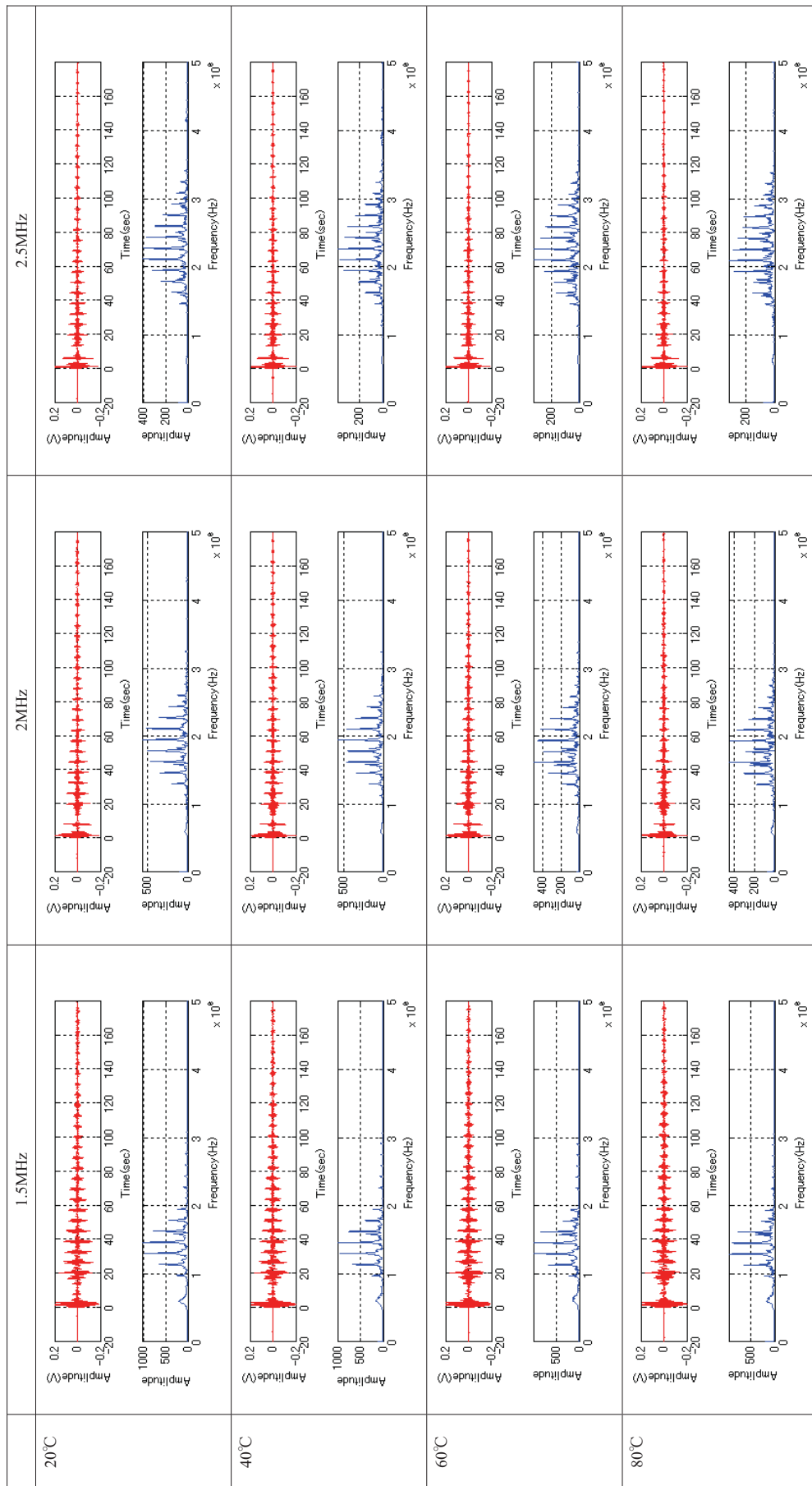
**Fig.4.4.2-7(1/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 5mm of board thickness using an improved trial production sensor.**



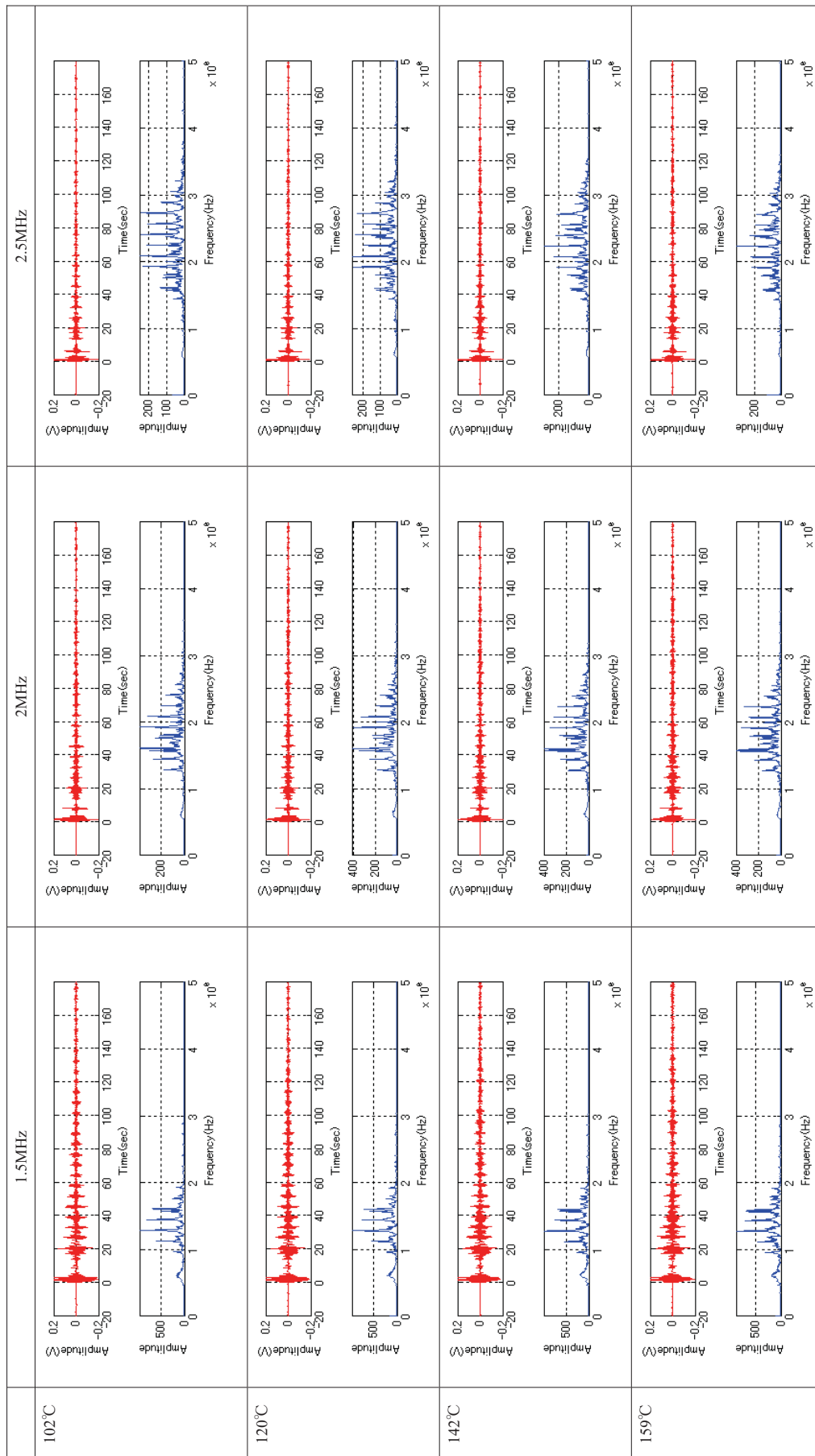
**Fig.4.4.2-7(2/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 5mm of board thickness using an improved trial production sensor.**



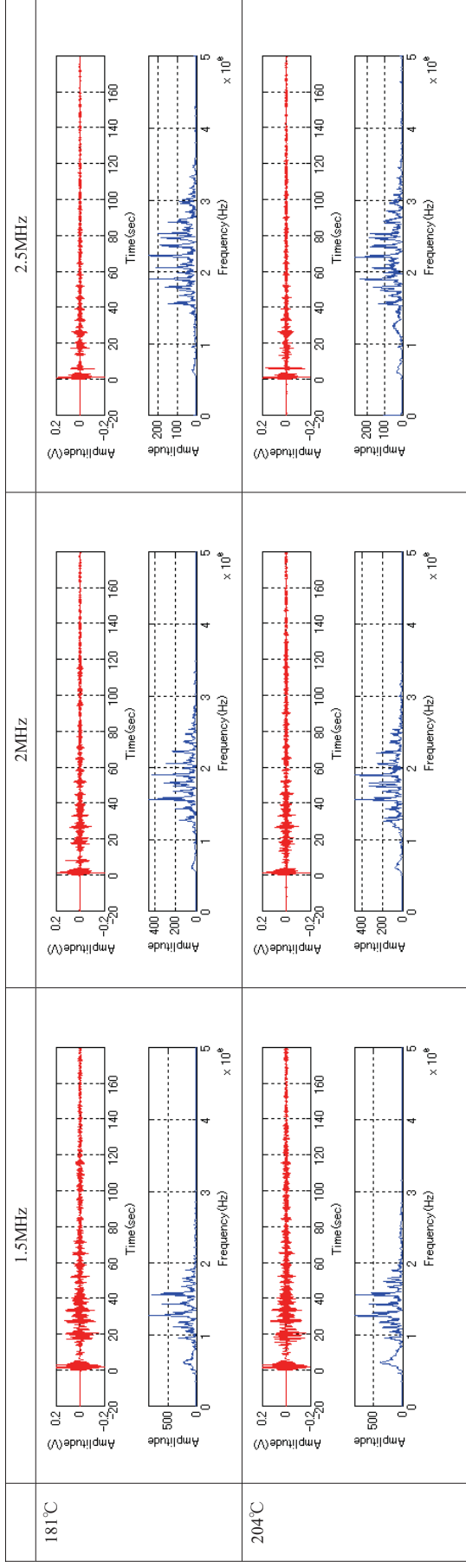
**Fig.4.4.2-7(3/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 5mm of board thickness using an improved trial production sensor.**



**Fig.4.4.2-8(1/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 10mm of board thickness using an improved trial production sensor.**

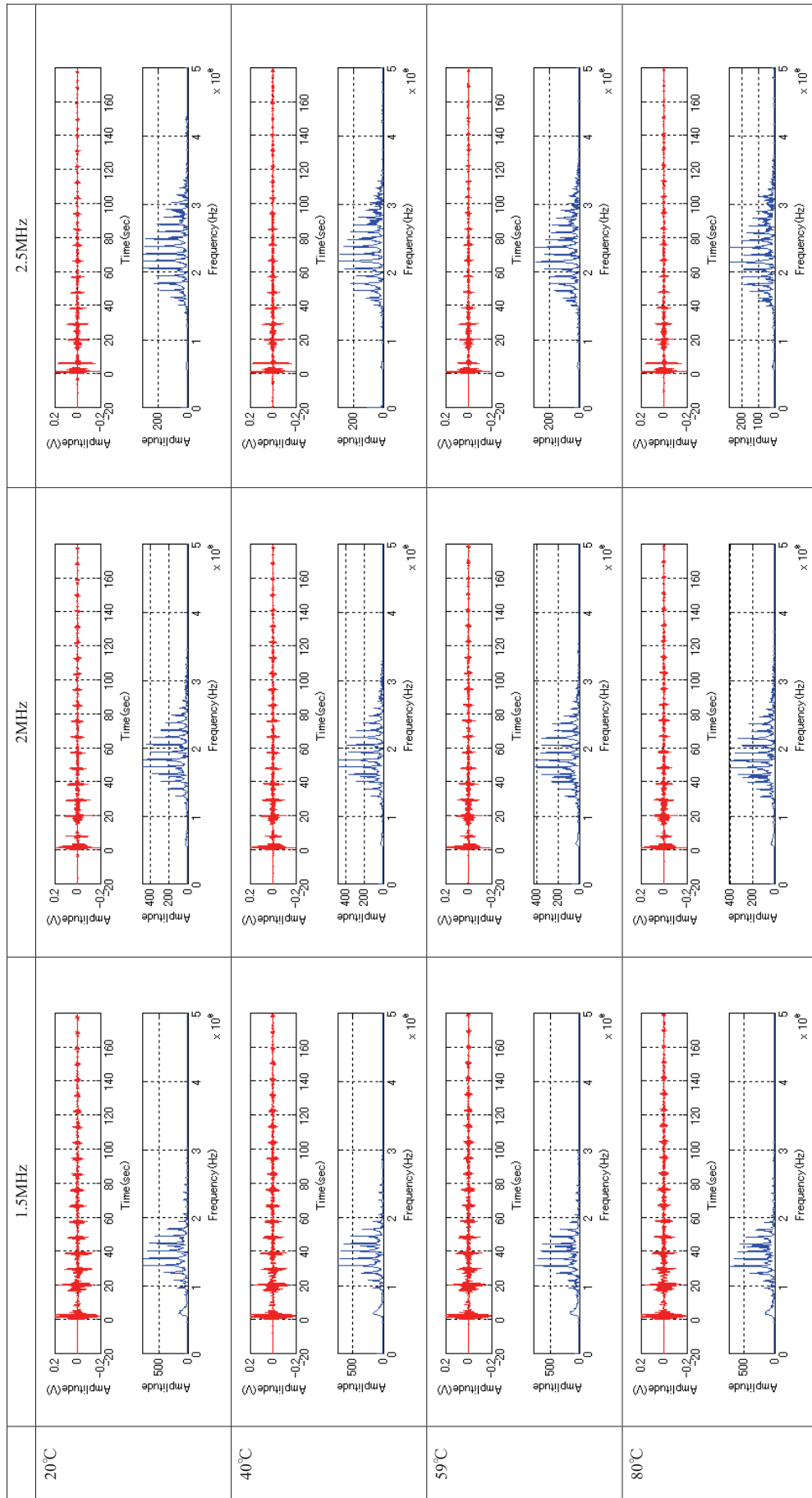


**Fig.4.4.2-8(2/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 10mm of board thickness using an improved trial production sensor.**

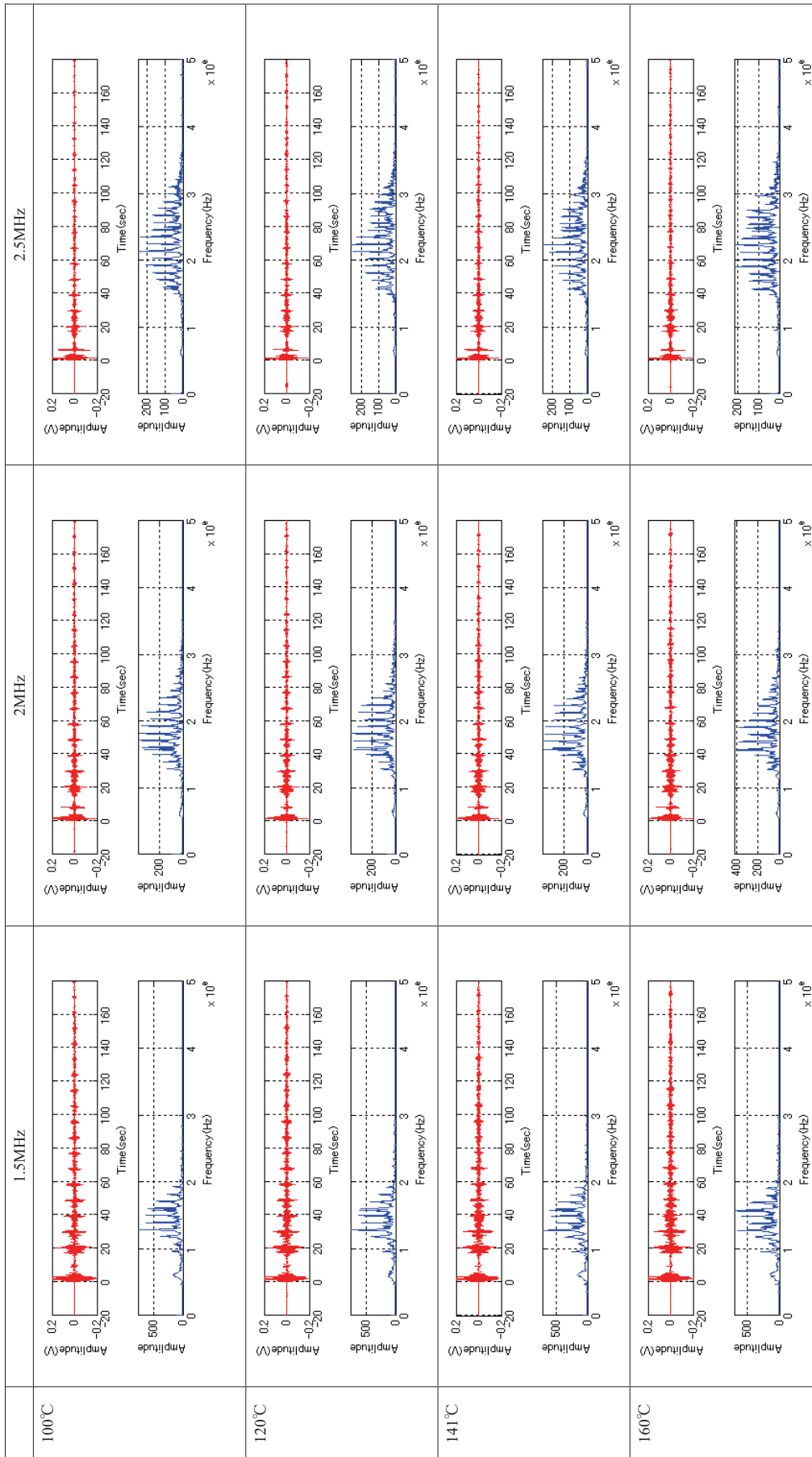


**Fig.4.4.2-8(3/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 10mm of board thickness using an improved trial production sensor.**

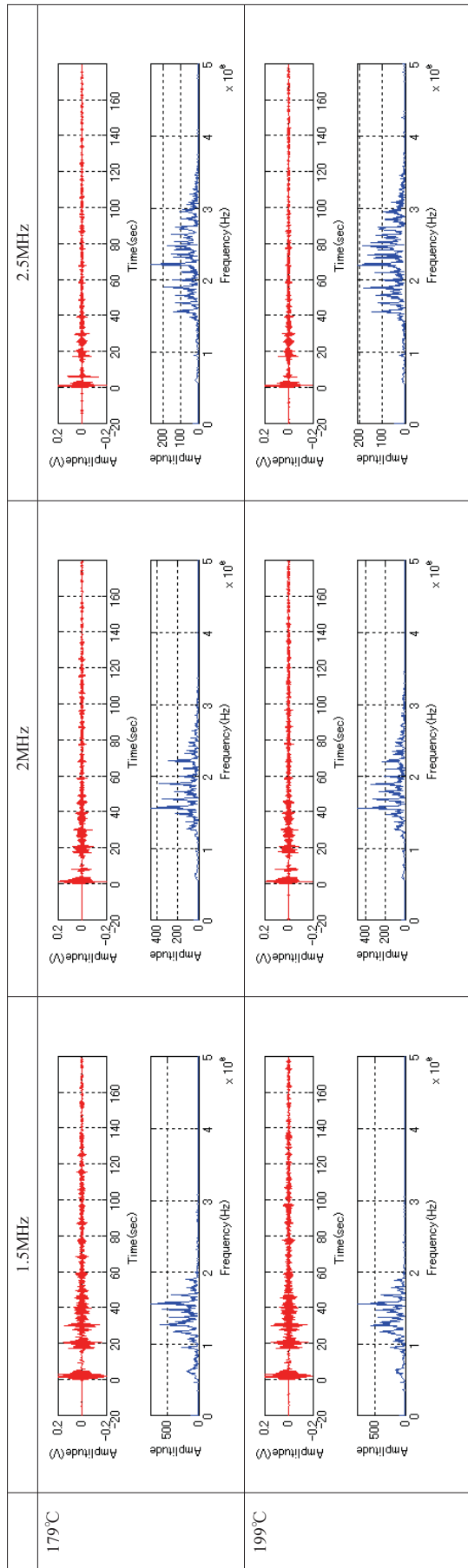




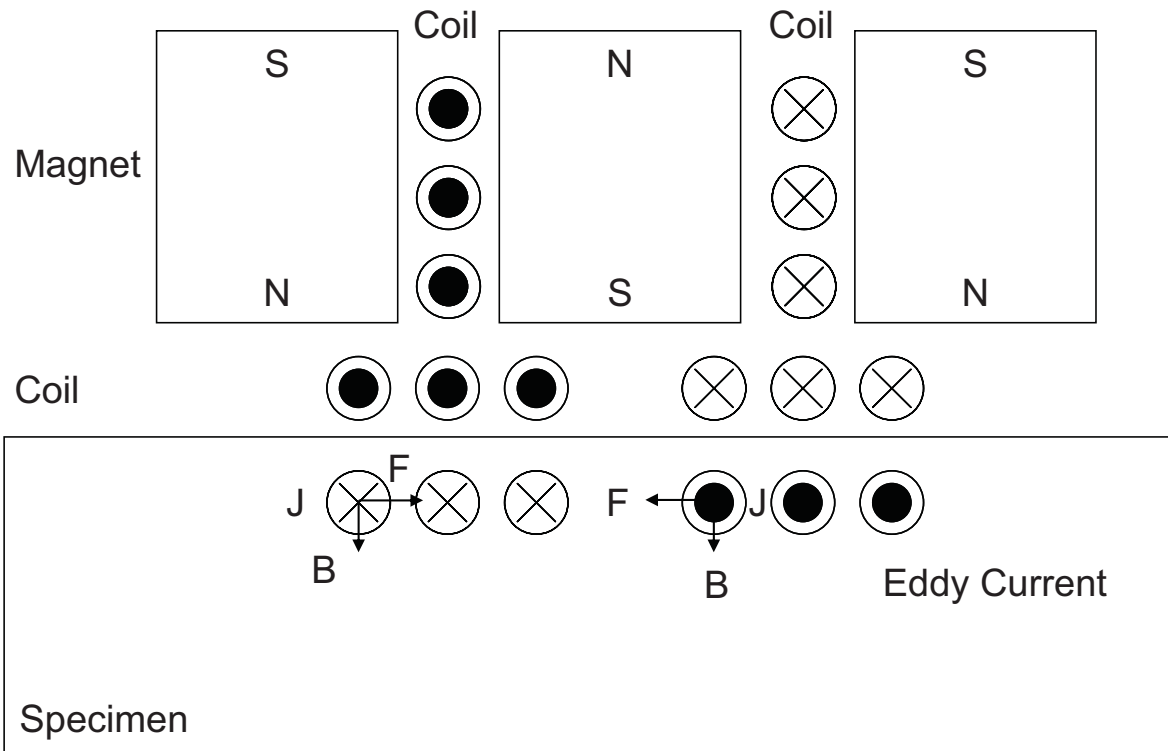
**Fig.4.4.2-9(1/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 15mm of board thickness using an improved trial production sensor.**



**Fig.4.4.2-9(2/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 15mm of board thickness using an improved trial production sensor.**



**Fig.4.4.2-9(3/3) The comparison of the waveform and FFT at various frequencies and temperatures, and measurement of a 15mm of board thickness using an improved trial production sensor.**



**Fig.4.4.2-10 Hybrid EMAT with above coil arrangement that can easily detect the magnetic flux in order to improve the detection sensitivity of measurement of pipe wall thinning.**

#### 4.4.3 水温測定

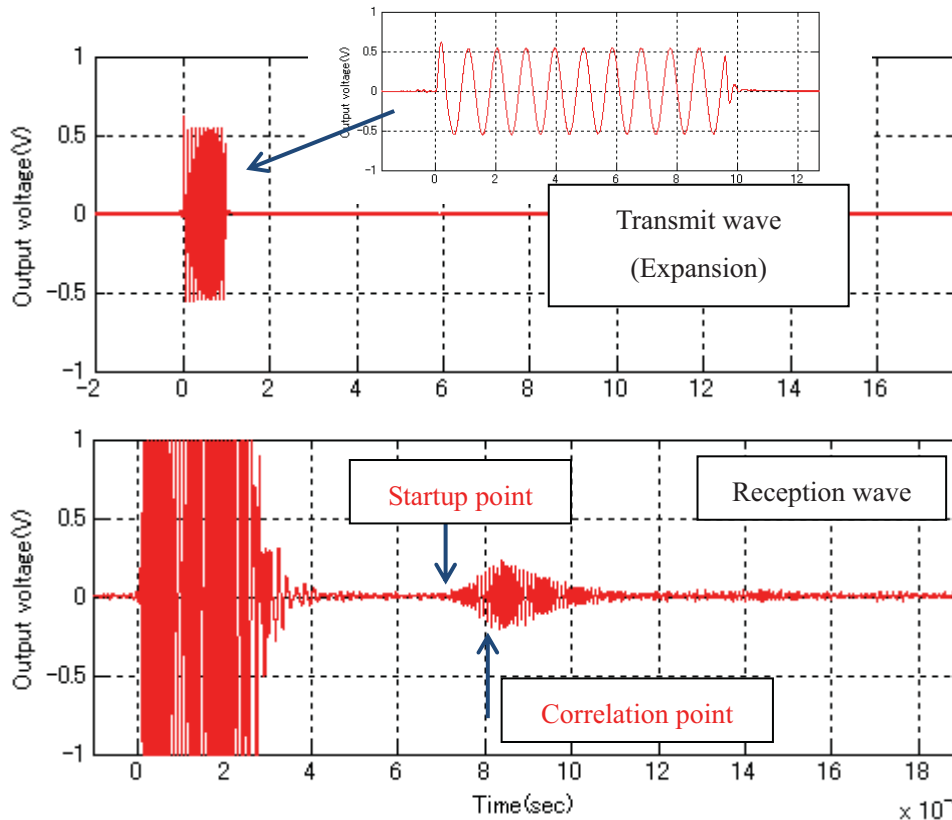
水中を伝搬する超音波波形は、配管内の乱反射による影響を受けるため、正確な受信位置を特定しにくい。そこで、送信波と受信波の相互相関係数を求め、最も相互相関係数の高い位置を受信位置として音速測定を行い、水温を特定する。表 4.4.3-1 は超音波の送信条件である。図 4.4.3-1 は送信波形と受信波形の相関位置を示している。この相互相関位置を受信位置として考えて水中の超音波音速を求めたが、受信波の立ち上がりの位置に対し、相互相関により最も値が大きくなる位置であるため、相互相関ポイントは大きくずれることがわかった。そこで、あらかじめ温度のわかっている状態で受信波形を得て、その波形との相互相関係数を求めることで受信波の立ち上がり位置を特定する方法を試みた。水温測定は試験装置の制約があるため、配管内に圧力をかけることができないため、0℃から 100℃までしか測定できない。そこで、中間温度となる 50℃のときに受信した波を参考波形として受信波との間で相互相関係数を求めた。水の超音波音速は、Greenspan-Tschiegg 式[G2]を使用し、参考値として利用した。図 4.4.3-2 は、50℃で受信した波形を基準波形とし、各温度の受信波と相互相関係数を求めて音速を求めたものと音速の参考値を比較したものである。非常によい一致を示す。但し、水の音速は 74℃をピークに持つ[G4]ため、前後の音速だけで、温度を特定することは難しい。これは、音速は体積弾性率を密度で除し、平方根を取ったものであるため、温度による密度変化により 74℃でピークになると考える。一方、原子力発電所では水の沸点である 100℃以上でも液体として用いるために圧力を加えている。このことから、100℃以上の音速測定の際には圧力と温度を考慮した音速のデータベースが今後必要になる。また、74℃近辺であってもコイルの直流抵抗による配管表面温度の測定により求められた音速に相当する温度を推定できる。これもハイブリッドセンシングであることのメ

リットである。

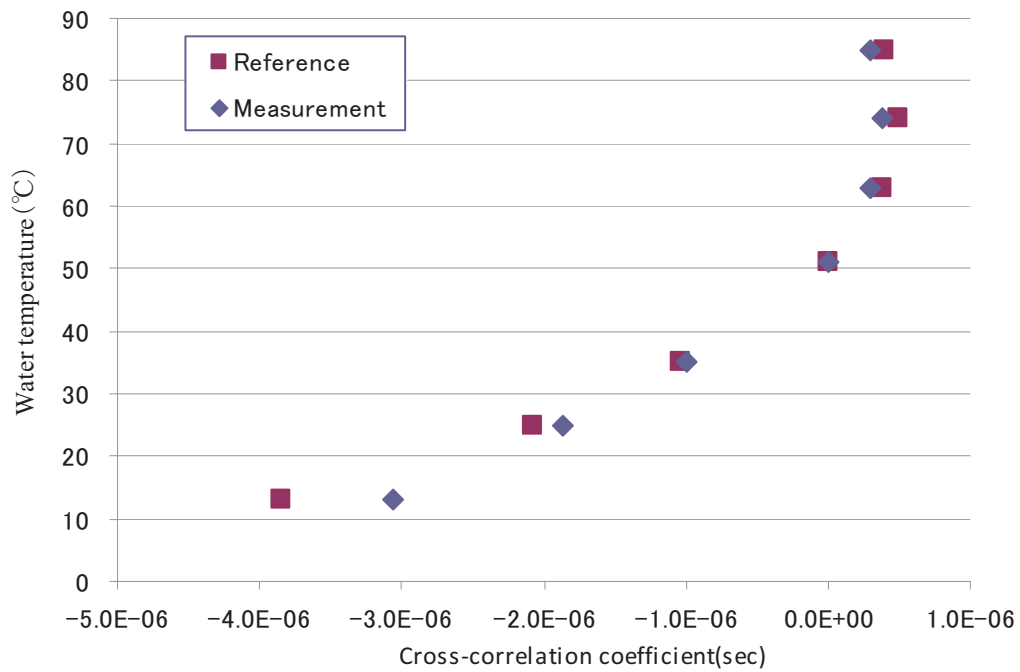
図 4.4.3-3 は、ハイブリッドセンシング用 EMAT のコイルの直流抵抗値と試験片温度の関係である。これまでと同様に温度と直流抵抗値は比例関係にある。絶対値が異なるのはコイルの巻き数を変更したためである。図 4.4.3-4 は試験時の写真である。SS400 は強磁性体であるため、EMAT の磁力だけで自己保持できることがわかる。これにより定点への設置が容易であることがわかる。図 4.4.3-5 は、13℃から 90℃までの水温測定試験時に得られた受信信号である。90℃でも十分高い検出感度が得られた。図 4.4.3-6 は、13℃から 90℃までの水中の超音波の理論速度と試験により測定した試験速度を比較したものである。高速部はよく一致している。低速部にバラツキがあるのは、水中の温度分布の影響であると考えられる。

**Table4.4.3-1 Conditions of the test for the selected magnet**

RAM-10000	Frequency	1MHz	Filter (NF FV-628B)	High pass	0.5MHz
	Burst No.	10		Low pass	1.5MHz
	Pre-amplifier Gain	30dB	Oscilloscope (Lecroy)	Averaging	200
	Mail amplifier Gain	46dB		Sampling time	1Gs/s
Specimen	Outer Diameter: $\phi$ 114mm, Thickness:5.8mm				
Temperature	Room Temp. to about 90°C				

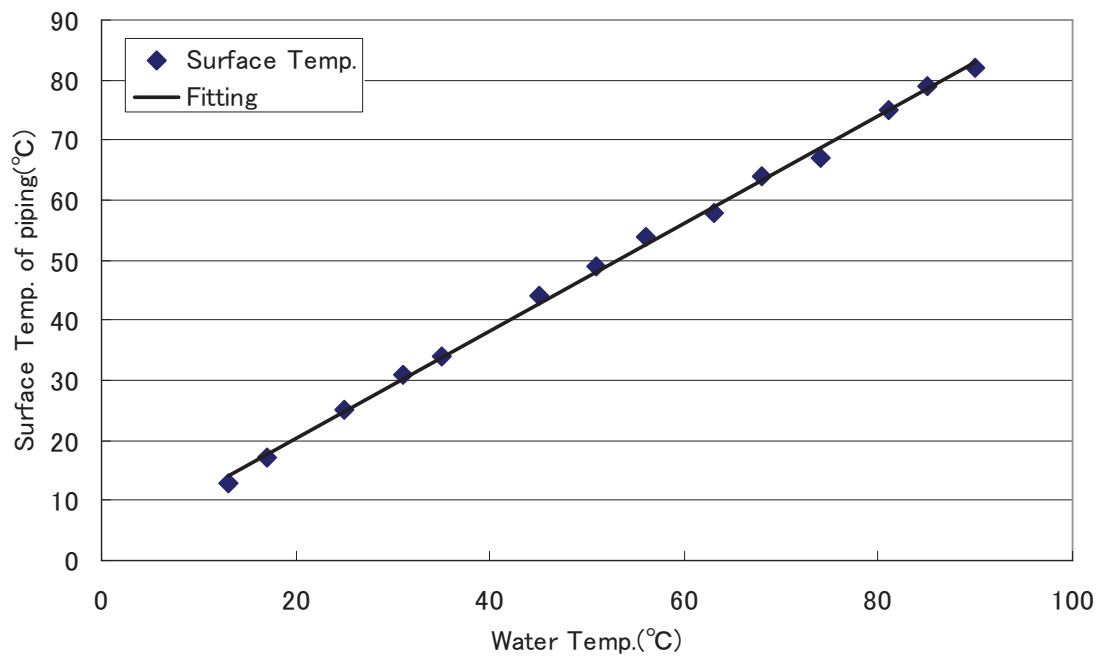


**Fig.4.4.3-1 The connection between starting position of ultrasonic reception, when performing cross correlation using a transmitted wave, and the correlation position. Since the correlation position was in agreement with the direction of the received wave peak, the exact position estimation of it was not completed.**

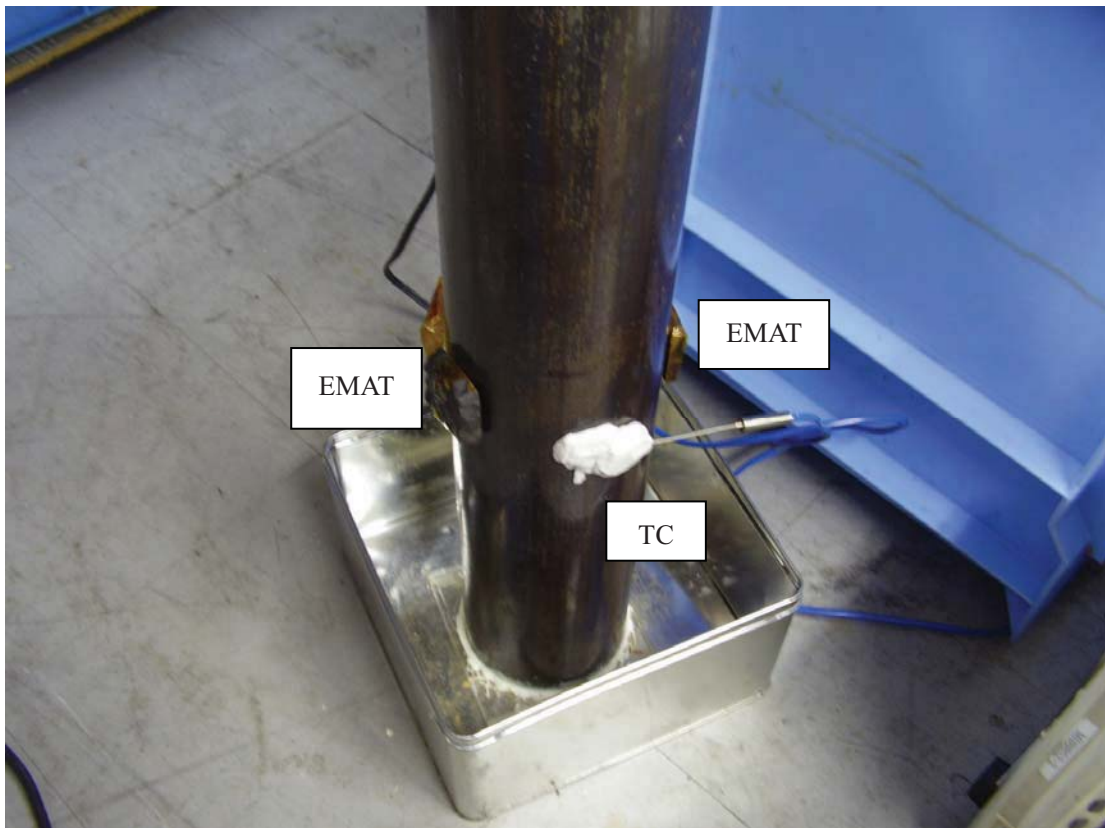


**Fig.4.4.3-2 The comparison between reference value and the cross-correlation coefficient. The cross-correlation coefficient is changing with temperature gradient. Caution is required for measurements above 50 degrees C, since there is a place witch lacks a cross-correlation coefficient.**

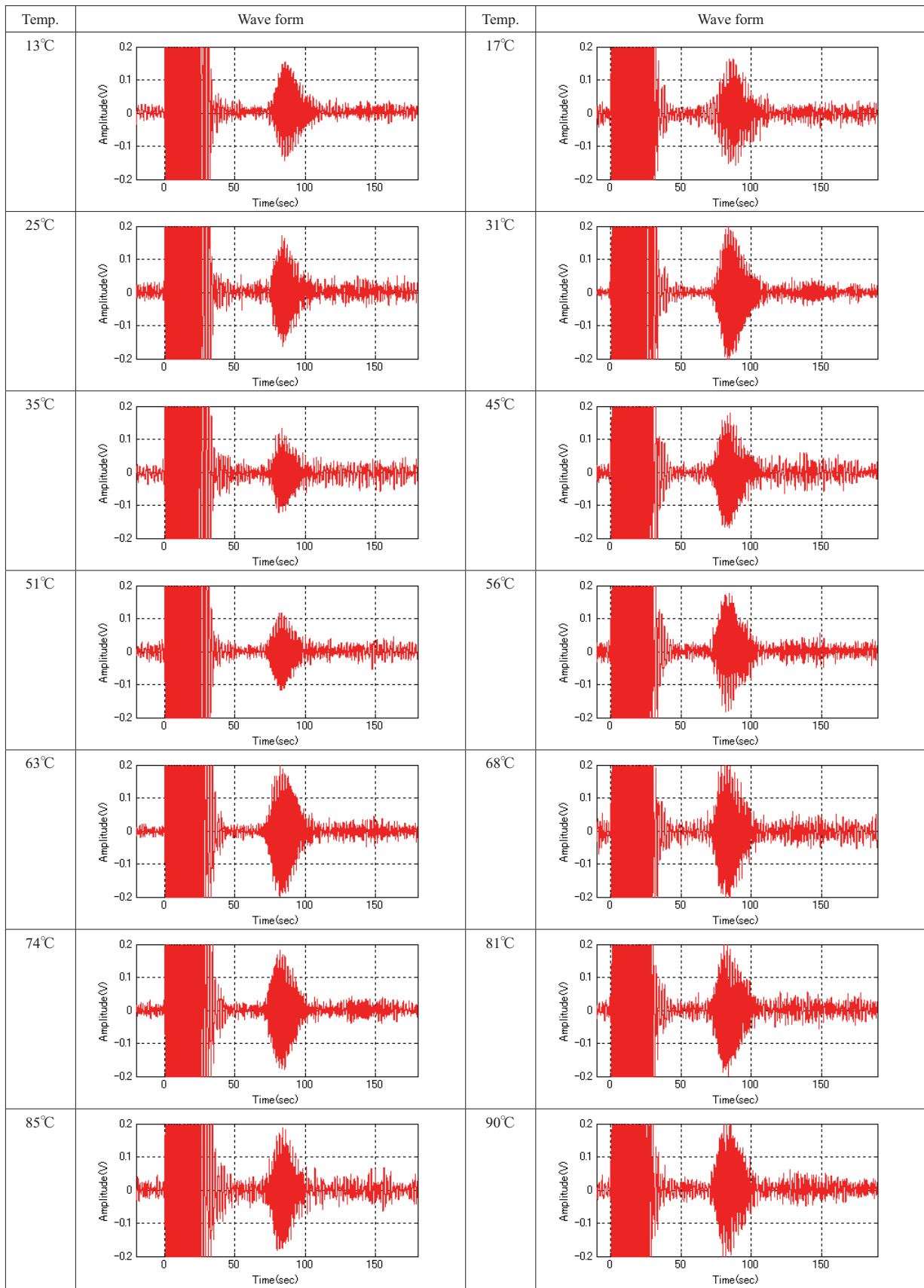




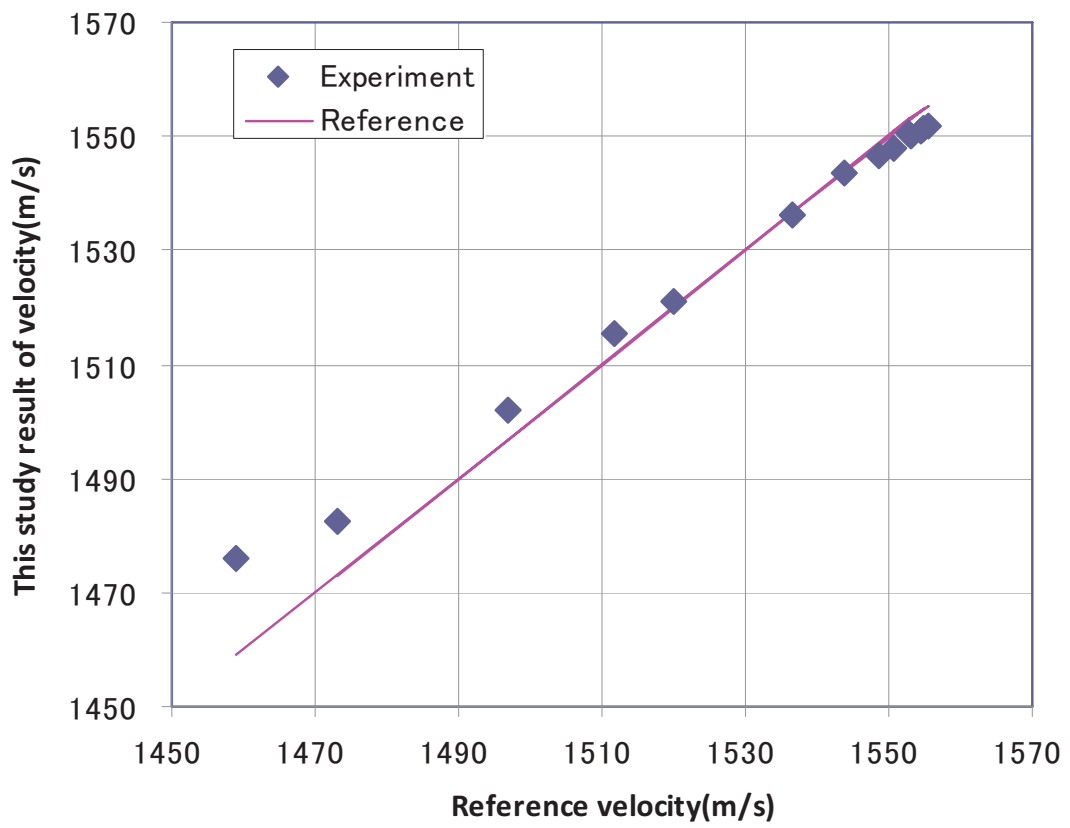
**Fig. 4.4.3-3** The comparison between water temperature, determined using DC resistance of an EMAT coil, and piping surface temperature. Also when it measured on a piping, it turned out that coil DC resistance has temperature and proportionality.



**Fig.4.4.3-4 The photograph of the measurement of water temperature. EMAT is carrying out measurements in an area opposite to thermometer. The thermometer (TC) is inserted in the hot water inside of piping and takes flat temperature by stirring.**



**Fig. 4.4.3-5 Received waveforms of the ultrasonic wave detected for each water temperature. The ultrasonic wave have been received very clearly for temperatures up to 90 degrees C.**



**Fig.4.4.3-6 Relationship between theoretical velocity and experimental velocity in water from 13 to 90 degree C [T17\*].**

## 4.5 結言

本章では、1つのセンサで複数の物理量を計測できる、ハイブリッドセンシングの検証を行った。具体的には、配管表面温度、配管減肉量、内部流体温度の3つの物理量を1つのセンサで測定できるハイブリッドセンサを考案、試作し、ハイブリッドセンシングの原理確認、精度確認を行った。

試作したセンサは、流体内に縦波を発生させる縦波発生用センサと配管板厚を測定するための横波発生用センサを1つのセンサとして測定できるハイブリッドセンサである。試作したハイブリッドセンサを用いて、水を内部流体として、90℃までの水温を測定し、200℃までの配管板厚と配管表面温度の測定を行って、測定原理の確認と測定精度を確認した。

配管表面温度測定では、配管温度と EMAT コイルの直流抵抗に比例関係があることが確認できた。また、板厚にも依存せず、再現性を表す決定係数も 0.9993 以上と高い再現性を示した。

次に配管減肉を測定した。第3章では高温になれば磁石内で反射する受信波がノイズとして観察されるため、磁石ノイズカットフィルタが必要であった。そこで、磁石サイズ、EMAT 構造を見直した。その結果、高温でも磁石ノイズは現れなくなり、200℃の高温でも PER 法の場合  $2 \pm 0.03\text{mm}$  の精度で測定することができた。

水温測定については、受診した超音波波形が様々な波形の合成波であったことから、レーダーなどの分野で用いられる、送信波形と受診波形の相互相関係数を求めて受診波形中の送信成分を特定する手法を超音波の水温測定に適用することで水温測定できることを確認した。

本研究により、ハイブリットセンサを用いたハイブリッドセンシングが可能であることがわかったわけだが、その利用方法について以下に検討したい。

まず、ハイブリッドセンシングにはいくつかの精度上のメリットがある。そのひとつが温度補正である。通常、温度補正を行う場合、同じ場所に補償銅線を別途設けるか、別の場所で温度を測定し、その温度を用いて測定する必要がある。この場合、場所依存性を考慮したり、補償銅線の性能確認が別途必要であったりする。しかし、ハイブリッドセンシングの場合、実際に超音波を発生させるセンサ構造材自体で温度や水温を測定するため、場所依存性の考慮は不要であり、別センサの性能確認を行う必要はない。

ハイブリッドセンサによるハイブリッドセンシングを用いてマルチモーダルセンシングを行った場合、従来測定するデータの数倍のデータを測定することが可能となり、プラント状態監視に対し、新しい概念を生み出す可能性があると考ええる。

## 第5章

### 欠陥モニタリング用センサの研究

#### 5.1 序言

第3章、第4章では、減肉モニタリングを中心としたハイブリッドセンシング用 EMAT の研究を行った。しかし、配管ヘルスマニタリングのために必要な検出対象は減肉だけではない。軽水炉では維持基準が整備され、きずが発見された場合でもその余寿命予測を行い、きずの進展具合を監視することで補修を行わなくても運転を継続することができる制度となっている。特に軽水炉の場合、応力腐食割れなどステンレス鋼の溶接部や異材継手部の欠陥モニタリングに関心が高い。

従来研究で EMAT を用いた欠陥検出の研究はなされている[X1-X3、R3、T11]。しかし、いずれも機械的スキャン機構が必要であり、機械的スキャンにより信号ピーク位置を特定したり[R3]、信号処理としての差分処理[T11]を行ったりしている。モニタリングにとって、機械的スキャン機構の設置は装置の大型化、保守・補修方法の複雑化、高コスト化につながるため回避したい。

そこで、本研究では機械的スキャンを行わなくとも欠陥位置を同定し、差分処理などの信号処理を行わなくとも欠陥がモニタリングできる欠陥モニタリング用 EMAT の研究を行う。

## 5.2 EMAT の試作

### 5.2.1 磁石設計

欠陥モニタリング用 EMAT を機械的スキャン機構なしで設計するには、2 つの設計コンセプトを設け、それぞれのコンセプトに合った設計を行う必要がある。

1 つは磁石構造を見直すことによる EMAT の高感度化であり、もう 1 つはコイル配置方法の見直しによる信号処理の排除とノイズ低減である。本節では磁石構造の見直しについて述べる。

EMAT は、高温では感度が低下することが知られている。これは、磁石の磁束密度が温度上昇につれ減少するからである。従来、図 5.2.1-1 の PPM 磁石構造と呼ばれる磁石構造が採用されていた[T7]。しかし、徐らの研究[X2]により図 5.2.1-2 に示す Halbach 磁石構造[H3]であれば、磁束密度は図 5.2.1-3 のように 1.4 倍になり送受信合わせると 2 倍の受信感度の向上が見込めることが研究されている。

Halbach 磁石構造は縦方向に磁化した磁石と横方向に磁化した磁石を組み合わせることで、使用面だけに磁力を片寄せることができる。そのため、PPM 磁石構造に比べ高い磁力を得ることができる。

本研究では、Halbach 磁石構造を用いて欠陥モニタリング用 EMAT の設計を行う。



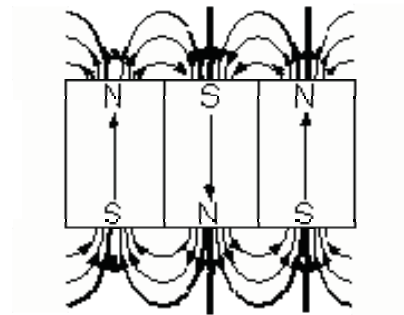
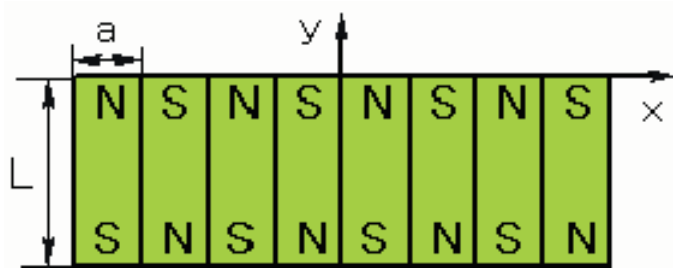


Fig. 5.2.1-1 Schematic view of a PPM magnet structure. The upper and lower sides of the strength of magnetic flux are equal [X2, T18\*].

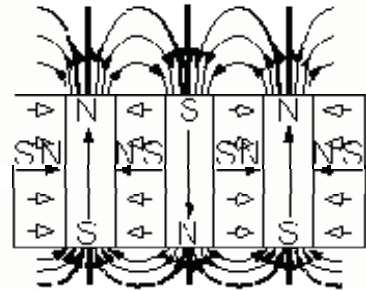
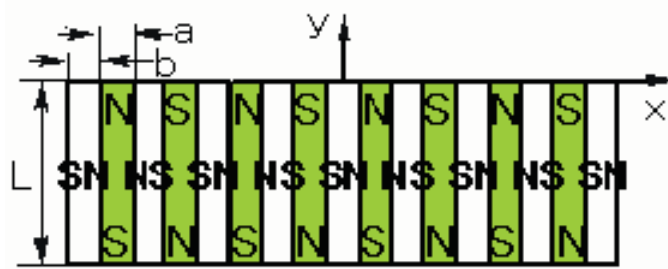
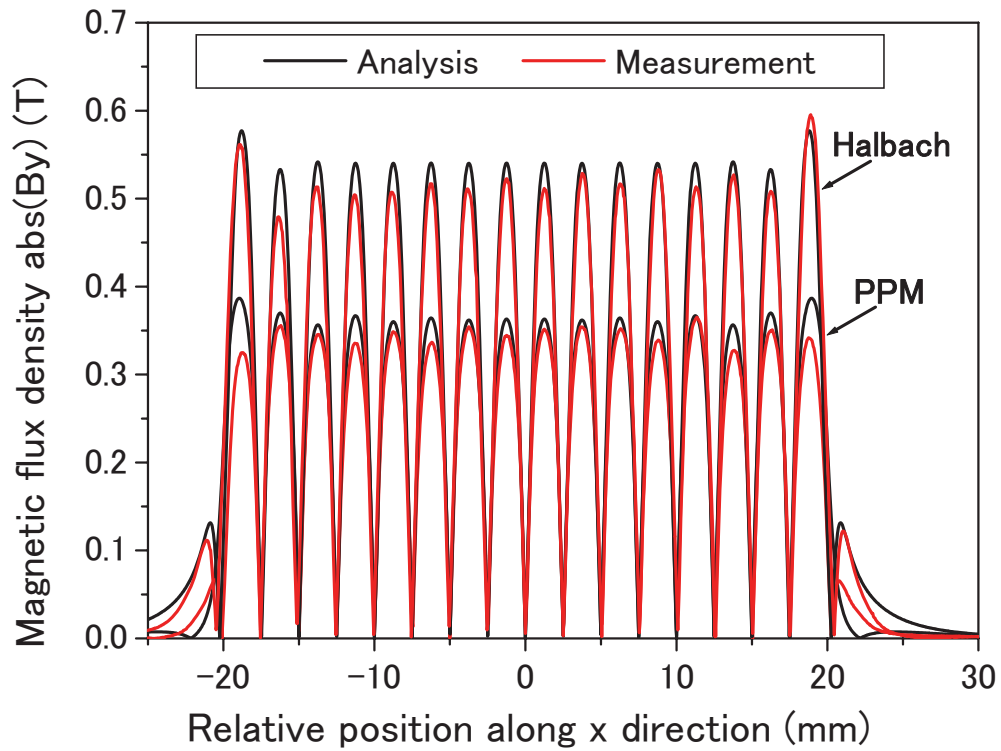


Fig. 5.2.1-2 Schematic view of a Halbach magnet structure. The upper and lower sides of the strength of magnetic flux are not equal. It is possible to upgrade the detection sensitivity of EMAT by strengthening magnetic flux on one side [X2, T18\*].



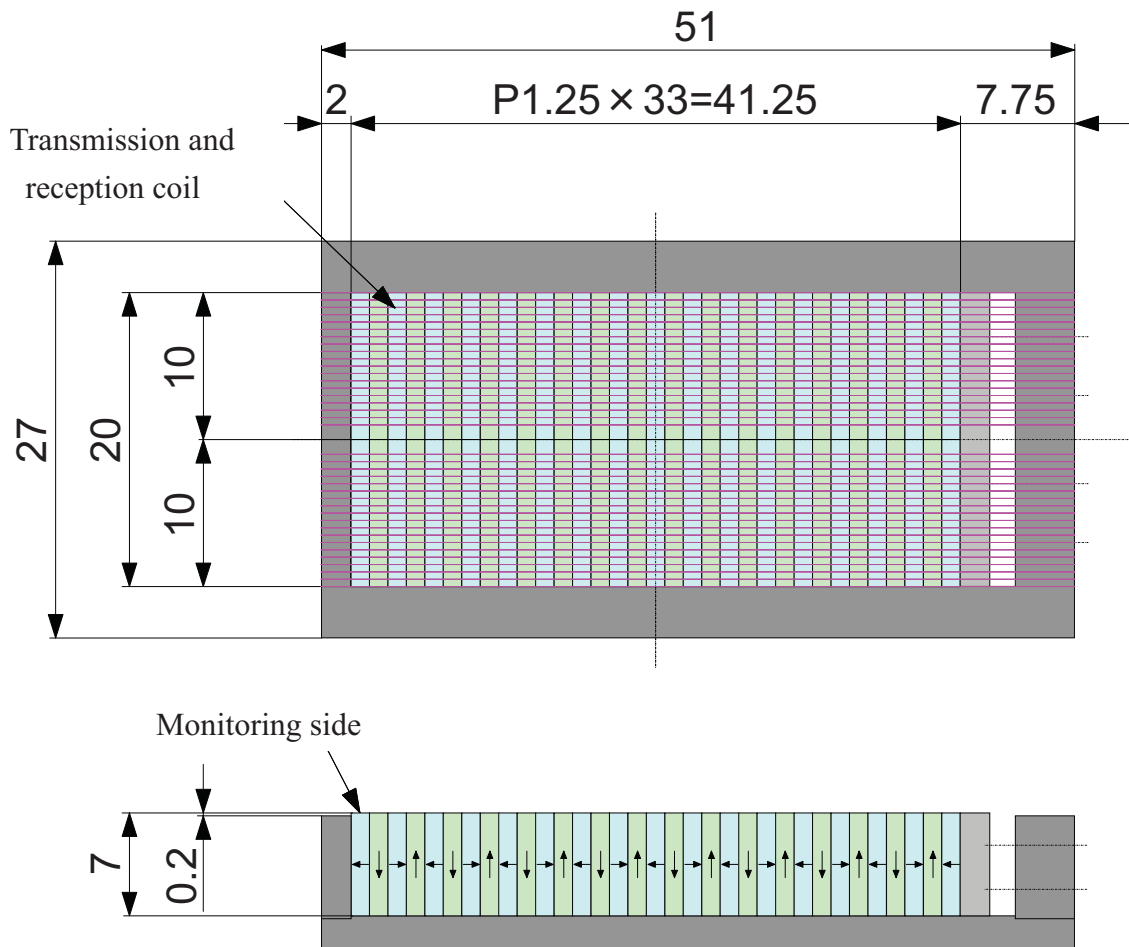
**Fig. 5.2.1-3 Comparison of measured and calculated magnetic flux density distributions for the Halbach structure [X2]. The Halbach magnet structure is about 1.4 times stronger than the PPM magnet structure. This was checked in both simulations and measurements [T18\*].**

### 5.2.2 ダブルコイル EMAT の設計

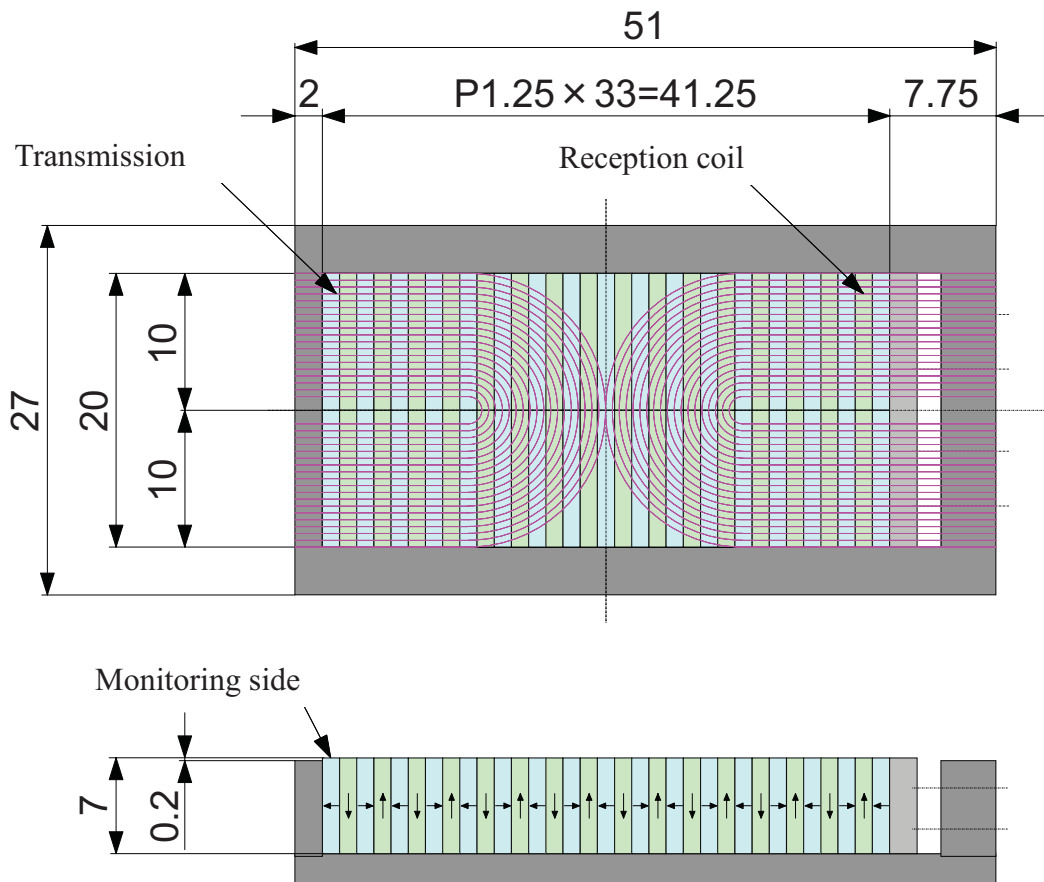
次に機械的スキャンを行わなくとも欠陥位置を同定し、差分処理などの信号処理を行わなくとも欠陥モニタリングが可能なコイル配置を検討する。徐ら[X2]の研究では、Halbach 磁石構造の下面にコイルを 1 枚配置し、図 5.2.2-1 に示す送信、受信を 1 枚のコイルで行う EMAT 構造を採用している。その結果、送信と受信時にコイル直下に誘導される渦電流が干渉し、超音波信号以外のノイズとなることから、欠陥の有無や半波長分移動させることにより波の重ね合わせによって欠陥信号を増幅させる信号処理を行う必要があった。このためには、機械的スキャン機構により EMAT を物理的に移動させる必要があった。

本研究では、機械的スキャン機構を不要とするために、Halbach 磁石配置の下面に送信用と受信用のコイルを配置した、図 5.2.2-2 に示すダブルコイル型 EMAT 構造を採用する。ただし、センササイズは従来研究と同じサイズとする。これは、磁石構造を大きくすればそれだけ感度はよくなるが、配管設置という観点で考えると小型の方がよいこと。また、同じサイズ比較することでダブルコイル化による性能比較が容易になるためである。

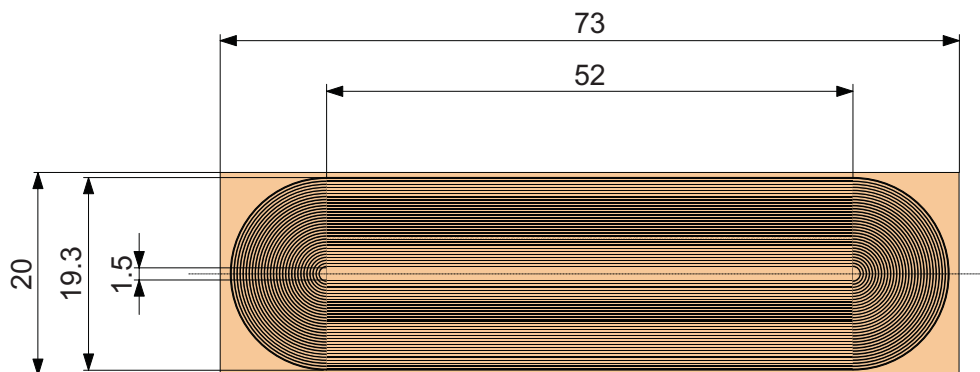
コイルは、図 5.2.2-3 に示す、徐らが用いたコイルにより設計する。コイルはプリント基板上に 30 巻きしたコイルを用いる。プリント基板を採用したのは磁石の磁束密度はリフトオフにより大きく性能が減少するため、リフトオフを可能な限り小さくしたい。そのために、100  $\mu\text{m}$  以下のプリント基板を用いた。



**Fig. 5.2.2-1 Design of single coil EMAT: transmission and reception coils are installed in a Halbach magnet structure. When an ultrasonic wave is transmitted and received with this structure, it is necessary to perform both a mechanical scan and difference processing [X2].**



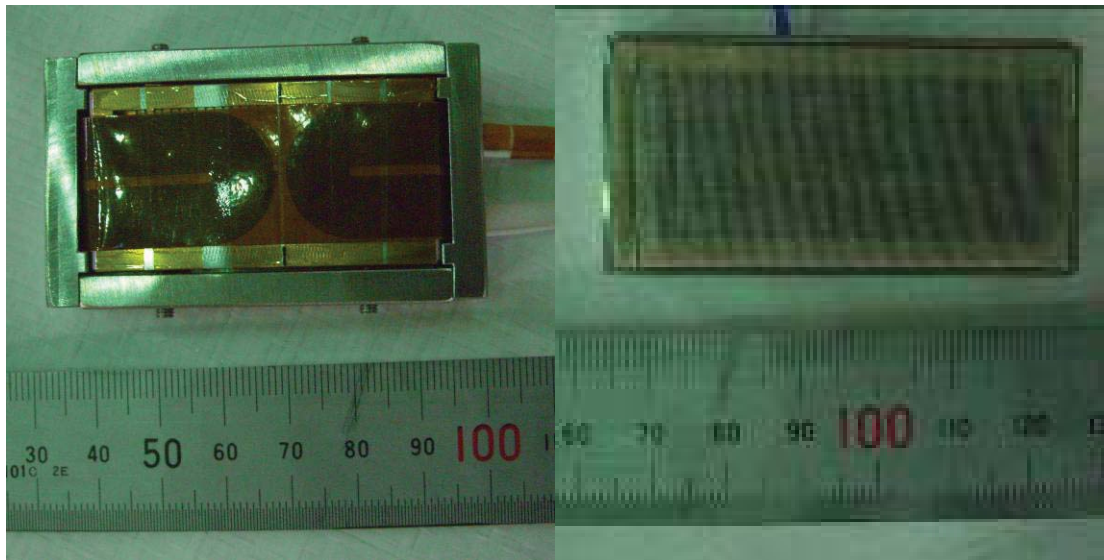
**Fig. 5.2.2-2 Design of double coil EMAT: transmission and reception coils are installed in a Halbach magnet structure.**



**Fig. 5.2.2-3 The designs of a 30turns coil on Printed Circuit Board (spacing of 0.1mm, and 0.2mm in width). Coil thickness is 100 micrometers or less.**

### 5.2.3 試作

送受信が1つのセンサで行えるダブルセンサ型 EMAT を試作した。試作した EMAT を図 5.2.3-1 に示す。図 5.2.3-1 の左図は EMAT 下面であり、右図はシングルコイル型 EMAT 下面 [X2]である。左図は、Halbach 磁石構造の中心部の左右に送信用コイルと受信用コイルが確認できる。コイルはプリント基板化されているが、耐熱性ポリイミドのシートで覆われている。右図は、機械スキャンが必要なためコイルを保護するシートが確認される。



**Fig. 5.2.3-1 EMAT prototype (Left Double coil EMAT, Right Single coil EMAT)**  
The size of the two EMATs are the same. Since the double coil EMAT doesn't need the mechanical scan, it is easy to install. [X2, T18\*]

## 5.3 試験方法

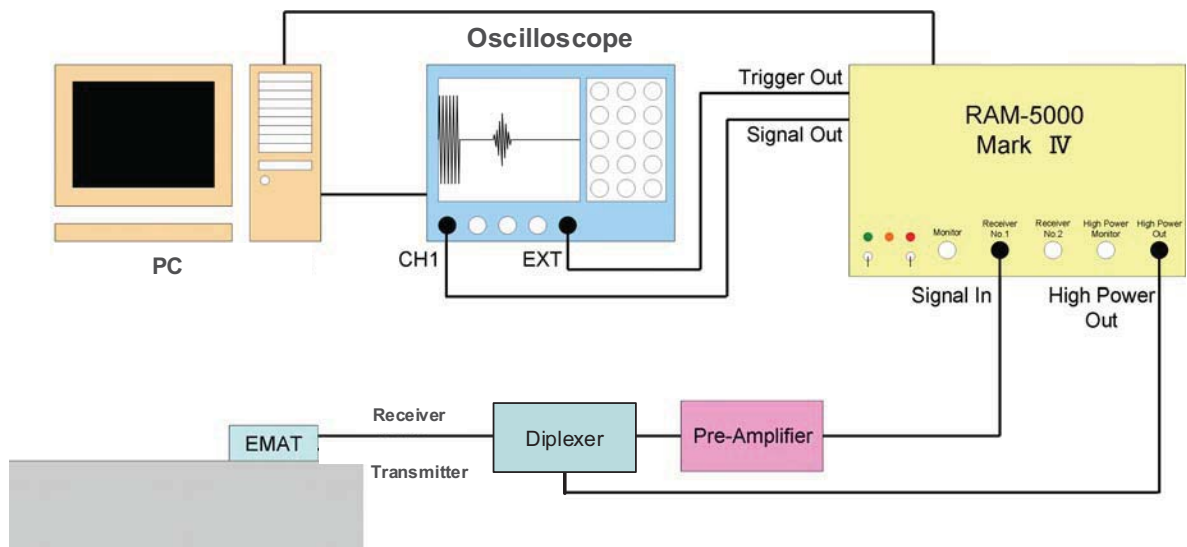
### 5.3.1 試験条件

性能試験は、SUS304 を用いて実施する。配管厚さは圧力容器への応用と FBR の冷却系配管を参考とし、50mm と 14.3 mm を採用した。50 mm が圧力容器を模擬しており、14.3 mm が配管を模擬している[T14]。試験片については、5.3.2 節で述べる。温度については、高温試験は行わず、常温で試験を行う。これは、200℃の高温環境下では Halbach 磁石構造を用いても、常温に比べ受信感度が 20%減じることが確認されている[T11]。本研究では、ダブルコイルと Halbach 磁石構造を有する EMAT で欠陥モニタリングが可能であるかの原理確認に焦点をあてるため、性能確認は常温で実施した。また、モニタリングに必要な欠陥位置同定法については 2.2.4 節で提案した新手法を検証する。

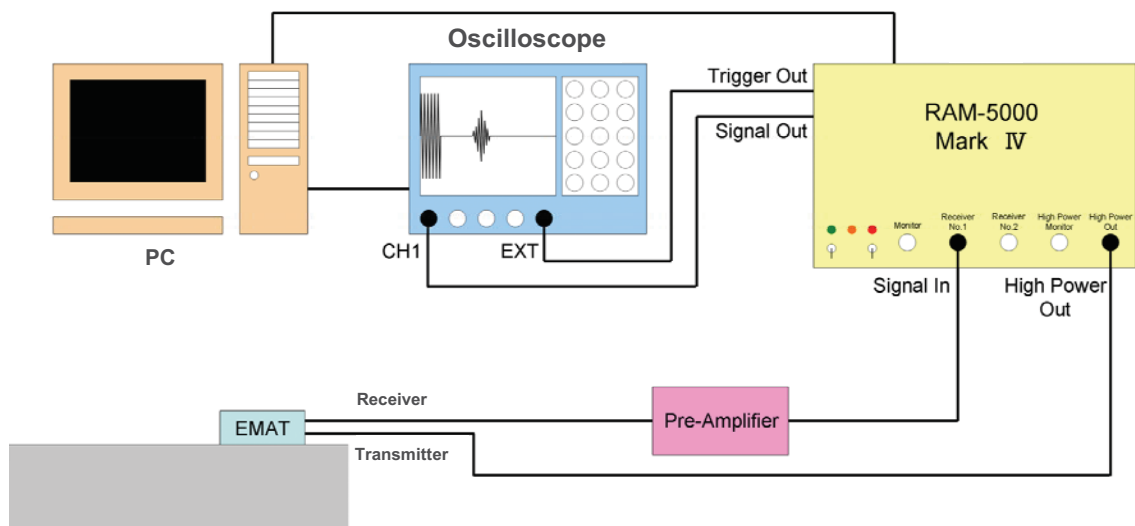
### 5.3.2 測定システム

図 5.3.2-1 はシングルコイル EMAT の測定システム。図 5.3.2-2 はダブルコイル EMAT の測定システムである。それぞれのシステムの構成は、超音波であるバースト波を発生する装置、プリアンプ、超音波波形を表示するオシロスコープ、超音波波形を受信し信号処理を行う計算機(PC)で構成される。シングルコイル EMAT のみ送受信信号を分配するディプレクサが必要である。

図 5.3.2-3 から 5.3.2-6 は、本章で用いる試験片である。図 5.3.2-3 から 5.3.2-5 は、圧力容器を模擬するための板厚 50 mm の試験片である。図 5.3.2-6 は、配管を模擬するための板厚 14.3 mm の試験片である。両方の試験片には放電加工 (EDM)によりスリット状の人工欠陥が付与されている。

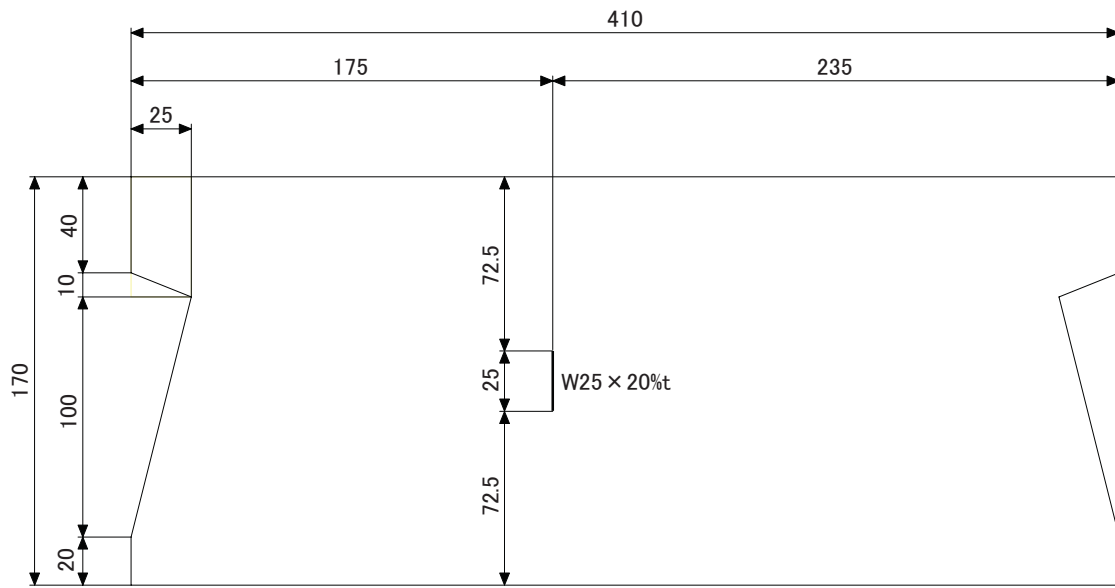


**Fig. 5.3.2-1 Measurement system of single coil EMAT test. Transmission and a reception are changed by diplexer.**

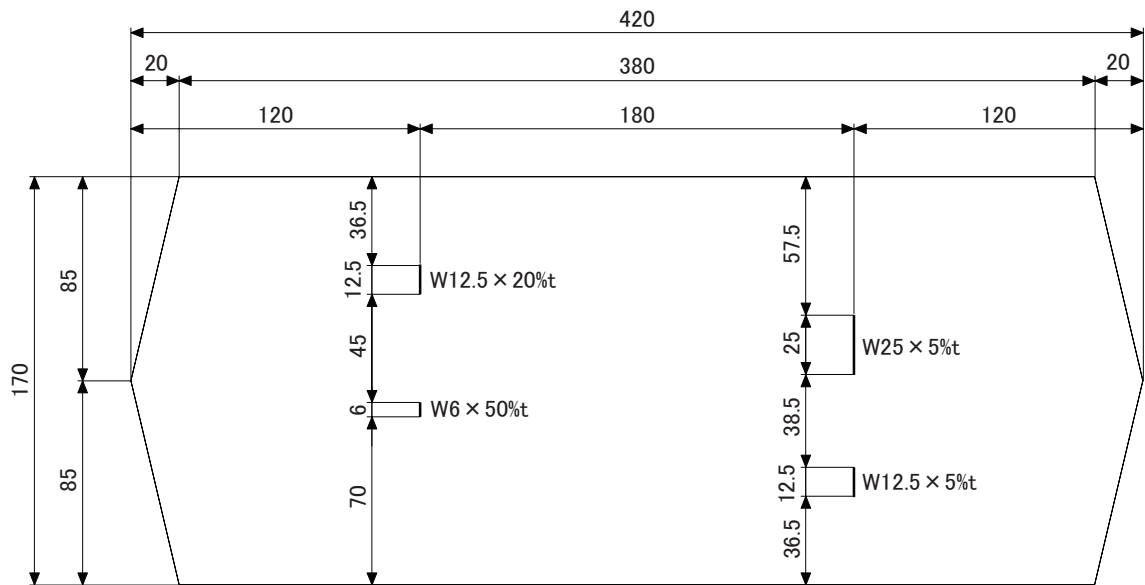


**Fig. 5.3.2-2 Measurement system of double coil EMAT test [T18\*]**

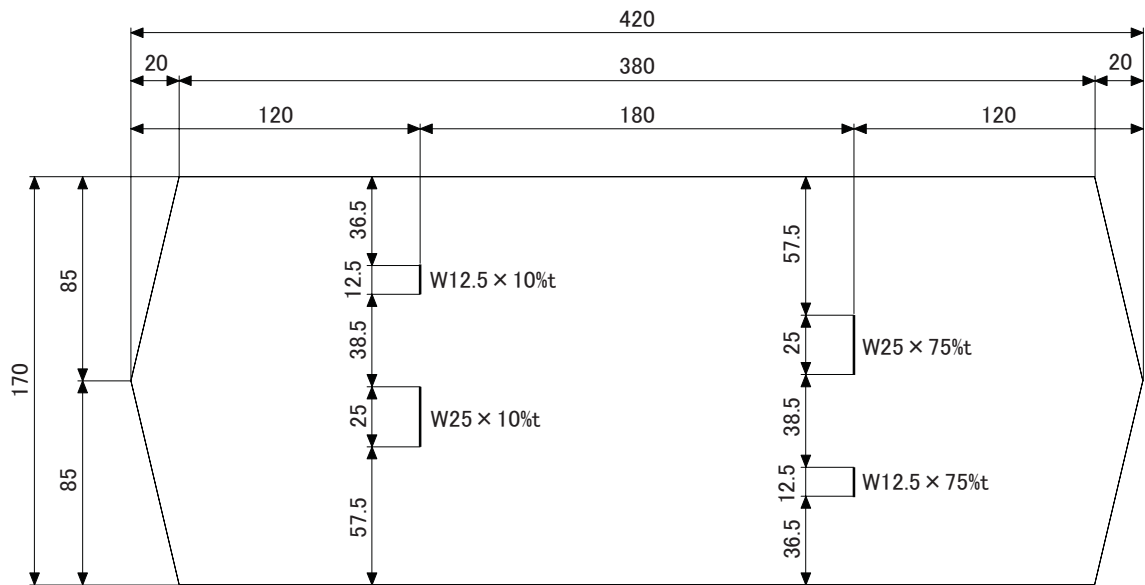




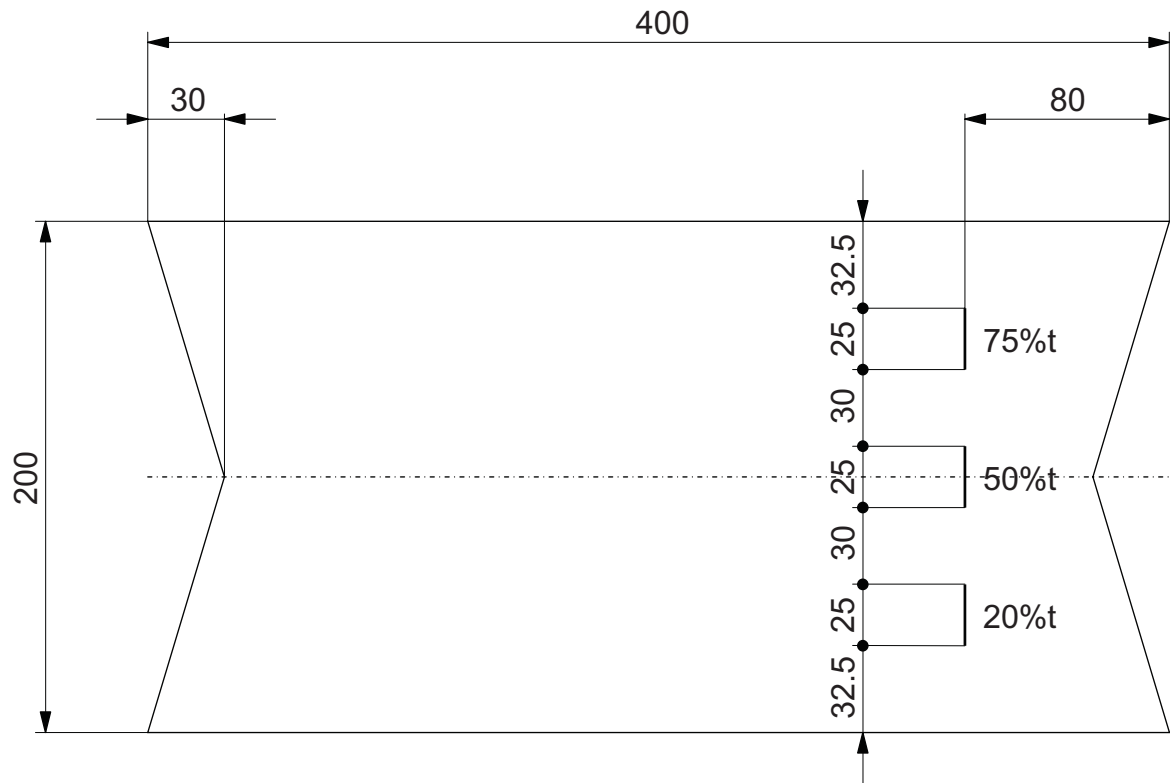
**Fig. 5.3.2-3 Specimen No.1 is 50mm thickness. This specimen has an EDM slit of 25mm in width, and 20% of a depth.**



**Fig. 5.3.2-4 Specimen No.2 is thickness 50mm. This specimen has some EDM slit of 25mm in width 5% of a depth, 12.5mm in width 5% of a depth, 6mm in width 50% of a depth, and 12.5mm in width 20% of a depth.**



**Fig. 5.3.2-5 Specimen No.3 is thickness 50mm. This specimen has some EDM slit of 12.5mm in width 10% of a depth, 25mm in width 10% of a depth, 25mm in width 75% of a depth, and 12.5mm in width 75% of a depth.**



**Fig. 5.3.2-6 Specimen No.4 is thickness 14.3mm. This specimen has some EDM slit of 25mm in width 75% of a depth, 25mm in width 50% of a depth, and 25mm in width 20% of a depth.**

## 5.4 試験結果

### 5.4.1 周波数依存性の確認

第2章の式2.1.3-1で示したとおり、超音波の屈折角は励磁周波数に依存するため、周波数により受信感度がどの程度影響するかを確認する。本節では、超音波の屈折角を変化させる周波数と超音波エネルギーを変化させるバースト波数をパラメータとして受信感度の影響を確認する。

まず、EMAT設置位置として、欠陥からモニタリング EMAT までの水平距離を決定する必要がある。超音波強度を向上させるためには、バースト波数を多くすればよいが、バースト波数を多くした場合、不感帯時間も長くなる。配管などの薄い板の場合は不感帯が長いと欠陥信号が検出できない可能性がある。また、水平距離が長いと試験片内の減衰により検出感度が下がる。

そこで、超音波が直接欠陥に照射される路程である 0.5skip（底面で1回反射されて試験片表面に到達する路程を 1.0skip という）の距離で測定を行う。このとき、板厚 50mm を用いて確認を行った。板厚 50mm の場合、ある程度のモニタリング範囲が得られる屈折角約  $60^\circ$  に相当する水平距離 100mm を設定した。試験条件を表 5.4.1-1 にまとめる。

図 5.4.1-1 は、バースト数 2 波、板厚 50mm の各周波数における受信波形、図 5.4.1-2 は、バースト数 3 波、板厚 50mm の各周波数における受信波形である。

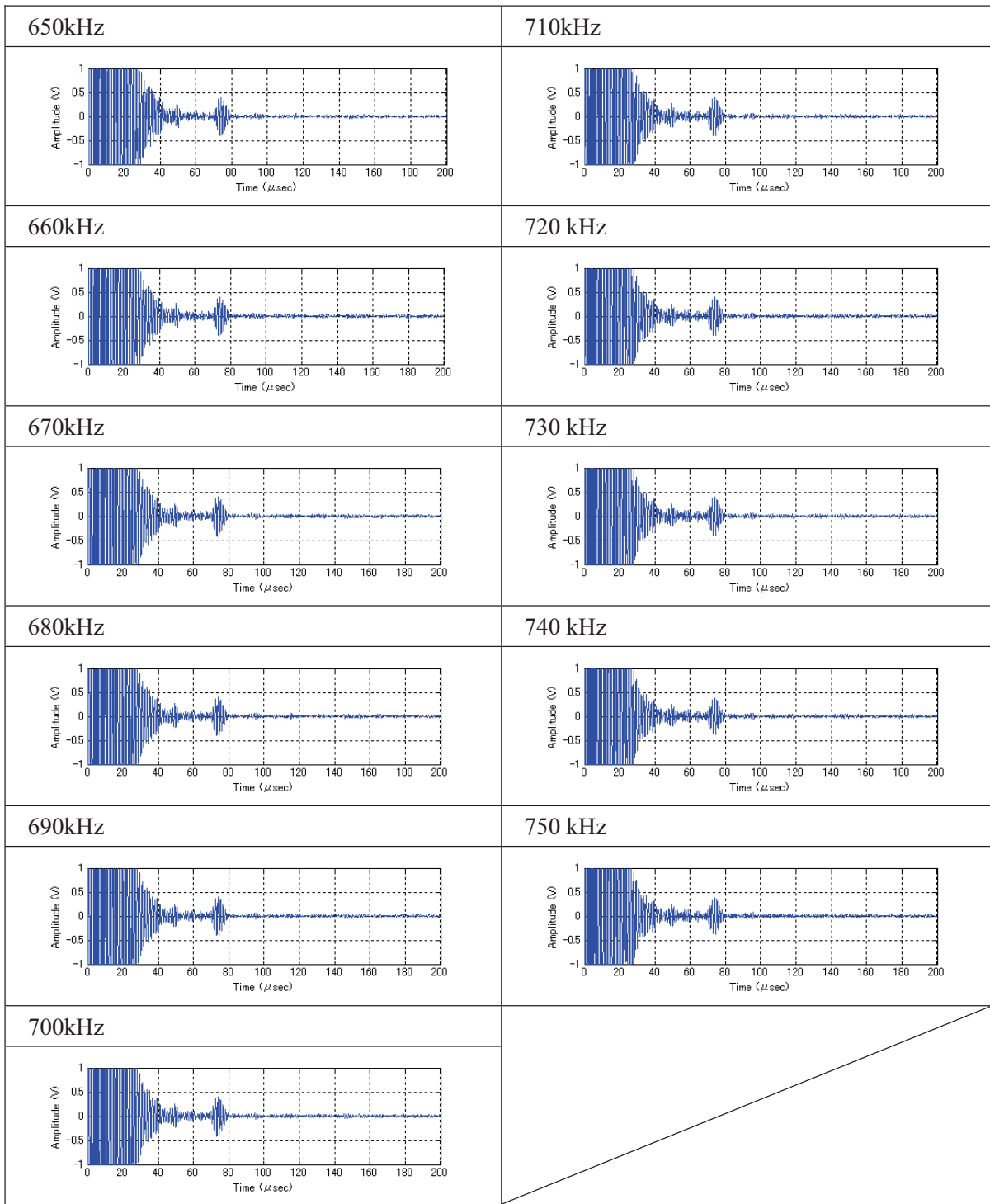
それぞれの受信波のピークを比較を図 5.4.1-3 に示す。約 680kHz でピークとなる。また、バースト波数が多い方がエネルギーが大きくなるため受信感度も向上することが確認できた。

表 5.4.1-2 は、バースト数 2 波の場合の受信ピーク、ノイズレベル、信号対ノイズ比(S/N)である。表 5.4.1-3 は、バースト数 3 波の場合の受信ピーク、ノイズレベル、信号対ノイズ比(S/N)である。S/N は、バースト 3 波の場合、12 から 15

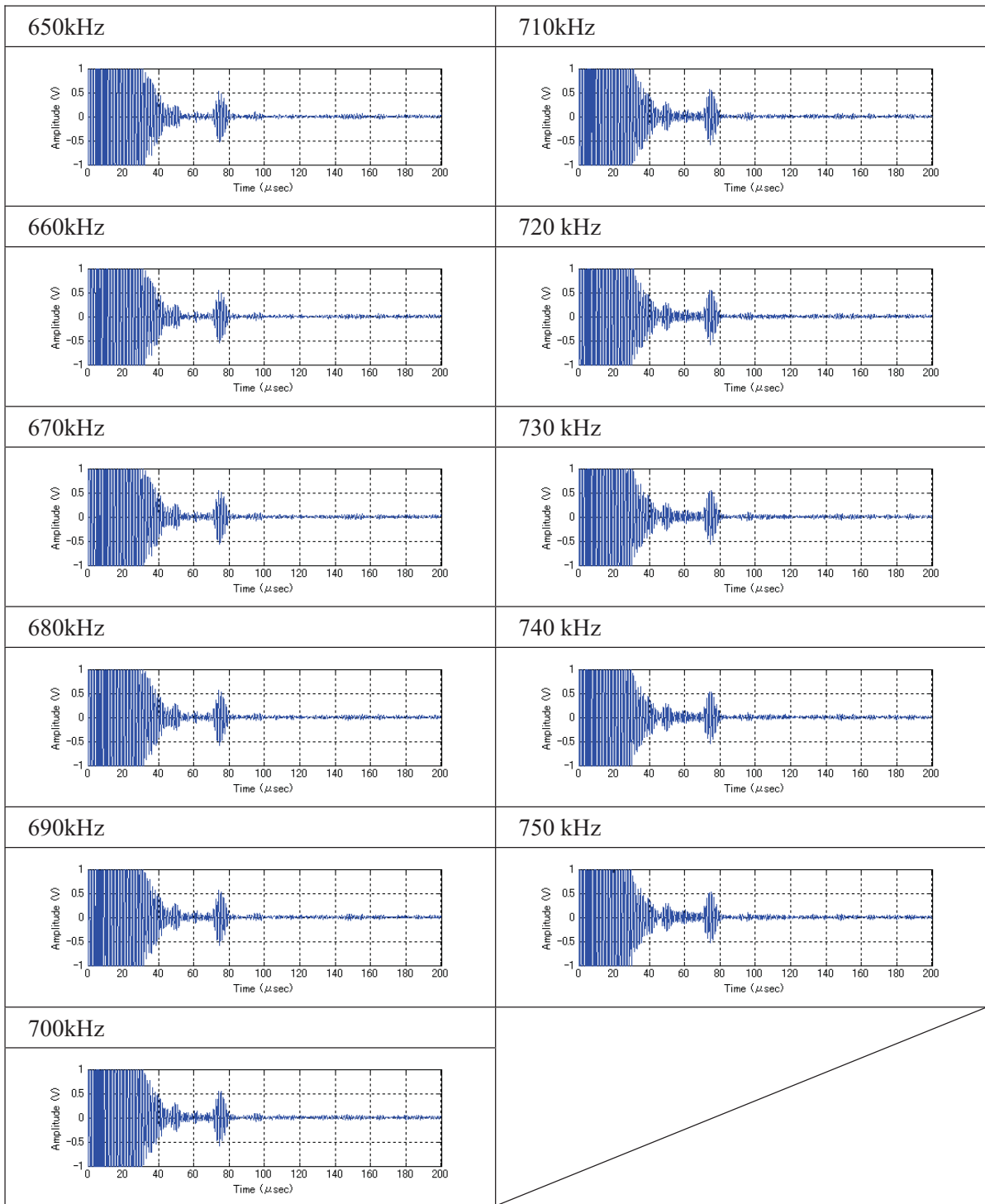
あり、信号レベルとしては十分であると考え。ここで、次節以降の試験ではバースト波数 3 波、周波数 680kHz を用いて試験を行うこととした。

**Table 5.4.1-1 Test conditions**

Thickness (mm)	Frequency (kHz)	Distance (mm)	Burst number	Exciting voltage (V)	Specimens EDM Slit size (W : mm)
50	650-750	100	2, 3	About 1500	W25×20(No.1)

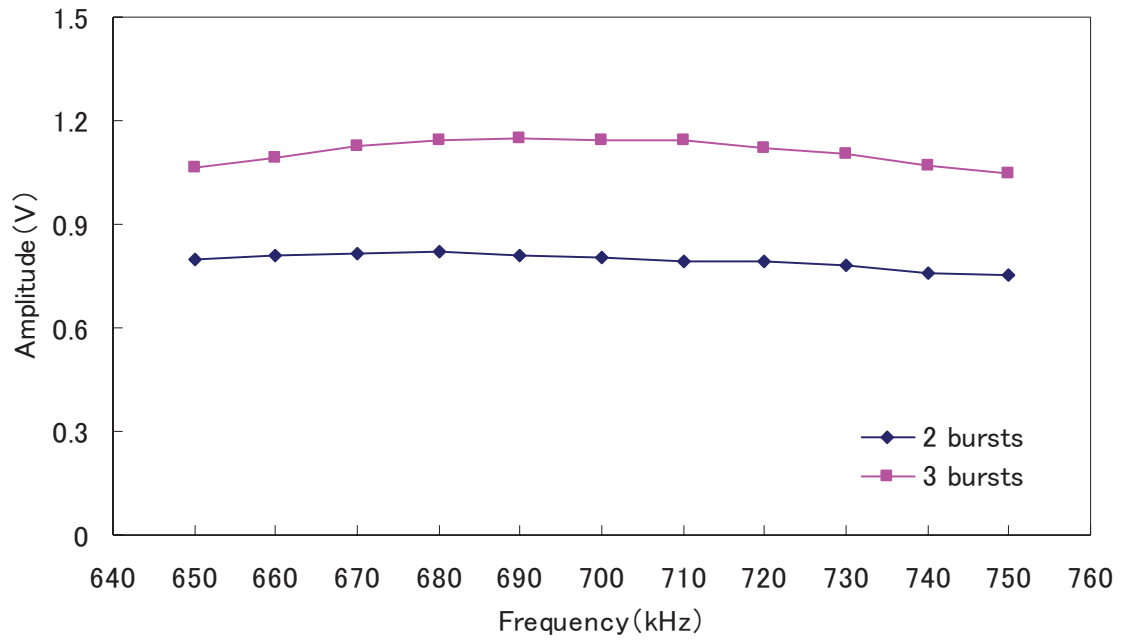


**Fig. 5.4.1-1 Change of the defect detection signal with frequency for a wave with two bursts (T=50mm)**



**Fig. 5.4.1-2 Change of the defect detection signal with frequency for a wave with three bursts (T=50mm).**





**Fig. 5.4.1-3 Relationship between frequency, number of bursts in the wave, and detection sensitivity for the thick specimen (T=50mm) [T18\*].**

**Table 5.4.1-2 Results of Frequency response test for a two bursts wave. (T=50mm)**

Burst No.	Freq. (kHz)	Amp. (V)	Noise (V)	S/N
2	650	0.80	0.06	12.78
		0.80	0.06	12.46
		0.80	0.06	12.40
	660	0.80	0.06	12.78
		0.81	0.07	12.48
		0.81	0.07	12.28
	670	0.82	0.07	12.56
		0.81	0.07	12.39
		0.81	0.06	12.69
	680	0.81	0.07	11.79
		0.82	0.07	12.61
		0.83	0.07	12.15
	690	0.81	0.06	12.72
		0.80	0.06	12.35
		0.81	0.07	12.28
	700	0.81	0.07	12.27
		0.81	0.07	12.10
		0.80	0.07	12.04
	710	0.79	0.07	11.40
		0.81	0.07	12.09
		0.78	0.07	11.86
	720	0.79	0.07	11.65
		0.80	0.07	12.01
		0.79	0.07	11.96
	730	0.79	0.07	11.99
		0.78	0.07	11.84
		0.77	0.07	11.03
	740	0.76	0.07	11.35
		0.76	0.06	12.03
		0.75	0.07	11.30
750	0.75	0.07	11.08	
	0.76	0.07	11.03	
	0.75	0.07	11.15	

**Table 5.4.1-3 Results of Frequency response test for a three bursts wave.  
(T=50mm)**

Burst No.	Freq. (kHz)	Amp. (V)	Noise (V)	S/N
3	650	1.06	0.07	14.10
		1.07	0.07	15.50
		1.07	0.07	14.31
	660	1.09	0.08	14.24
		1.11	0.07	15.40
		1.09	0.08	14.31
	670	1.11	0.08	14.55
		1.14	0.08	15.16
		1.12	0.08	14.44
	680	1.15	0.08	14.06
		1.16	0.07	15.53
		1.13	0.08	14.19
	690	1.15	0.08	14.17
		1.17	0.08	14.60
		1.14	0.08	13.72
	700	1.13	0.08	13.93
		1.15	0.08	14.68
		1.14	0.09	13.09
	710	1.16	0.08	14.14
		1.16	0.08	14.12
		1.12	0.09	12.46
	720	1.12	0.08	13.54
		1.14	0.08	13.98
		1.11	0.09	12.92
	730	1.11	0.08	13.42
		1.12	0.08	14.45
		1.09	0.09	12.02
	740	1.07	0.08	12.62
		1.08	0.08	13.13
		1.06	0.09	12.38
750	1.07	0.09	12.38	
	1.05	0.08	12.64	
	1.03	0.09	11.79	

## 5.4.2 距離振幅特性試験

5.4.1 節では、モニタリングする距離は探傷距離を 0.5skip と想定し、水平距離 100mm とした。本節では、最適なモニタリング位置を求めるため、EMAT と欠陥の水平距離を変更し、受信振幅との関係を観察する。観察結果よりモニタリングに最適な距離を求める。また、提案している 2.2.4 節の新しい欠陥同定方法についての検証を行う。

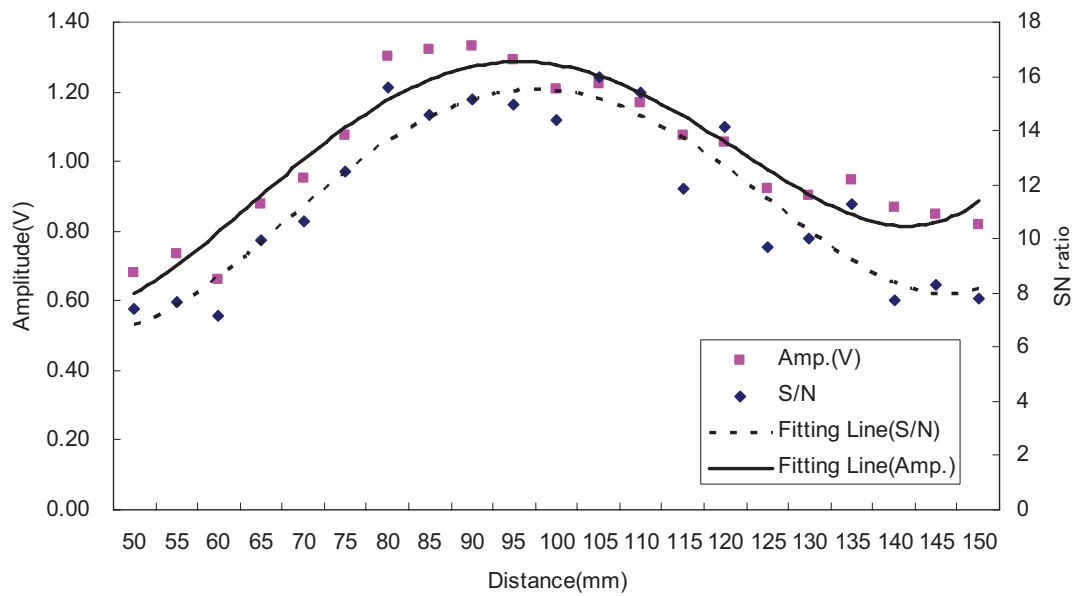
板厚 50mm の場合、EMAT と欠陥の距離を 50mm から 150mm まで変更する。

板厚 14.3mm の場合は、60mm から 200mm まで変更する。なお、試験準備の段階で 14.3mm の場合、バースト数 3 波では、受信感度が十分でないためバースト数は 5 波とした。

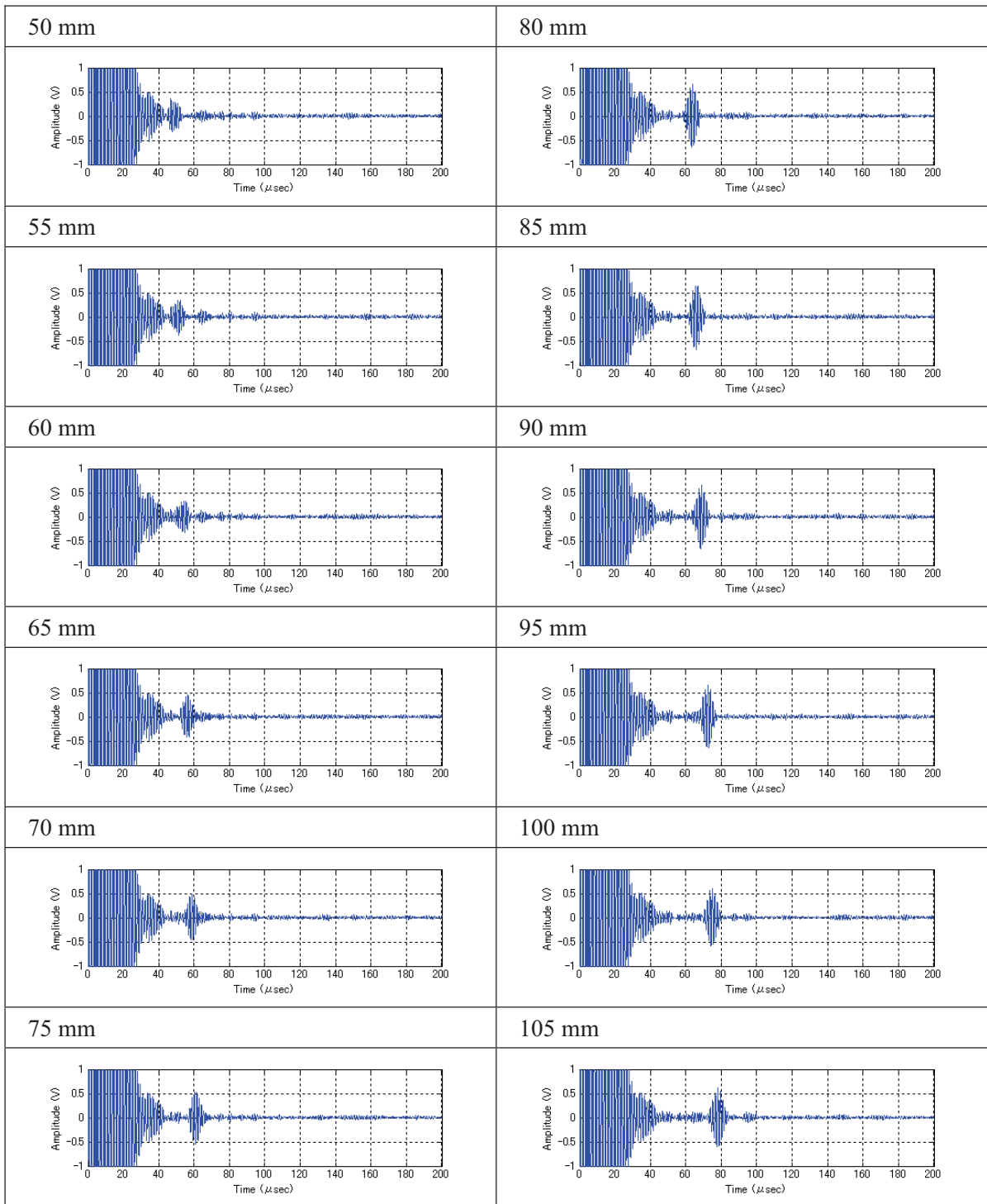
試験片は、板厚 50mm は No.1 試験片の幅 25mm、深さ 20%t の EDM スリットを板厚 14.3mm は No.4 試験片の幅 25mm、深さ 20%t の EDM スリットを用いた。

図 5.4.2-1 は、板厚 50mm における距離と振幅、S/N の関係である。生波形を図 5.4.2-2 に示し、このときの関係する値を表 5.4.2-1 に示す。なお、表 5.4.2-1 には後述する欠陥同定方法の新提案を検証するために式 5.4.2-1 で求められる屈折角  $\theta'$  を記載している。図 5.4.2-1 より、距離 95mm で受信振幅は最大となり、距離 100 で S/N が最高になる。そこで、厚板のモニタリングに利用する距離は 100mm とする。

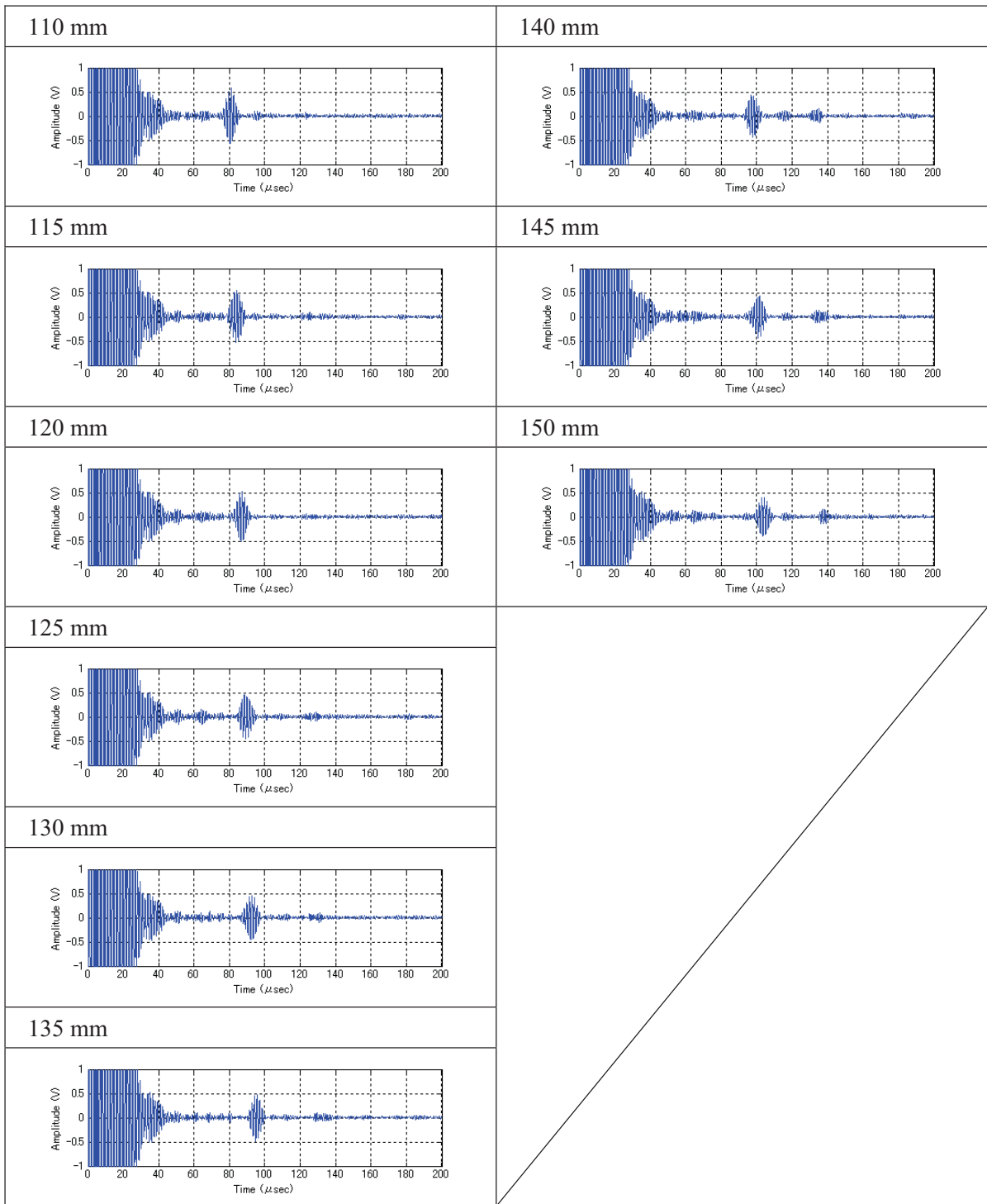
$$f' = \frac{C}{2a \sin \theta'} \quad (5.4.2-1)$$



**Fig. 5.4.2-1 Distance-amplitude characteristic test for a 50mm thick plate. Signal amplitude peaks at 95 mm, whereas the optimum S/N ratio is obtained at 100 mm.**



**Fig. 5.4.2-2 (1/2) Raw waveform of the detection signal for different testing distances. Longer distances require longer detection times**



**Fig 5.4.2-2 (2/2) Raw waveform of the detection signal for different testing distances. Longer distances require longer detection times.**

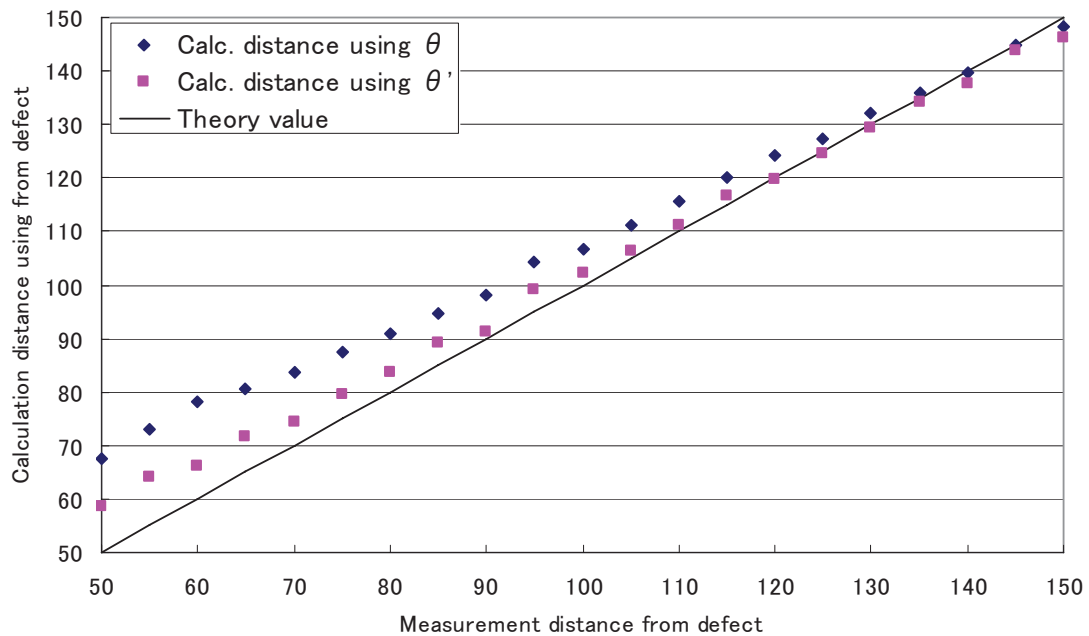
**Table 5.4.2-1 Measurements at different distances (50mm thick plate)**

Distance (mm)	Amp. (V)	Noise (V)	S/N	Peak Freq. (kHz)	Peak time ( $\mu$ sec)	Angle $\theta'$ (deg)
50	0.68	0.09	7.40	784.84	47.23	52.66
55	0.73	0.10	7.68	774.85	51.12	53.64
60	0.66	0.09	7.17	801.51	54.55	51.12
65	0.88	0.09	9.96	764.85	56.23	54.67
70	0.95	0.09	10.65	764.85	58.52	54.67
75	1.08	0.09	12.47	749.85	61.17	56.32
80	1.30	0.08	15.58	739.85	63.54	57.50
85	1.32	0.09	14.58	723.19	66.14	59.64
90	1.33	0.09	15.15	731.52	68.58	58.55
95	1.29	0.09	14.96	714.86	72.80	60.80
100	1.21	0.08	14.40	709.86	74.65	61.53
105	1.22	0.08	15.96	711.53	77.76	61.29
110	1.17	0.08	15.42	706.53	80.66	62.04
115	1.07	0.09	11.84	699.86	83.92	63.08
120	1.05	0.07	14.16	704.86	86.82	62.29
125	0.92	0.09	9.67	694.86	88.82	63.90
130	0.90	0.09	10.02	694.86	92.35	63.90
135	0.95	0.08	11.31	689.86	95.00	64.76
140	0.87	0.11	7.75	689.86	97.51	64.76
145	0.85	0.10	8.31	684.86	101.21	65.66
150	0.82	0.10	7.78	688.19	103.47	65.06



図 5.4.2-3 は、2.2.4 節で板厚 50mm で幅 25mm、深さ 20%t の欠陥に対し、水平距離を移動させた際の欠陥位置同定結果について提案した新しい欠陥同定手法と従来手法を比較したものである。表 5.4.2-2 は、それぞれの測定値をまとめたものである。従来手法は、欠陥信号が検出された時間と予め判っている超音波音速、励磁周波数により求められる超音波の屈折角  $\theta$  により超音波の路程を計算することで、欠陥位置を同定した。しかし、図 5.4.2-3 のように従来手法では理論値通りとならないことが確認された。そこで、励磁周波数により屈折角を求めるのではなく、受信波形を FFT 解析し、その際のピーク周波数を用いて屈折角  $\theta'$  を求めて、従来手法と同様に超音波の路程を計算により求めた。従来手法と新手法を比較すると水平距離で最大 11.85mm の改善がみられた。

ここで、理論値との違いについて考察する。主要因は超音波音速であると考ええる。超音波音速は厳密には鋼材毎に異なる。これが、プロット点の傾きの違いであると考ええる。

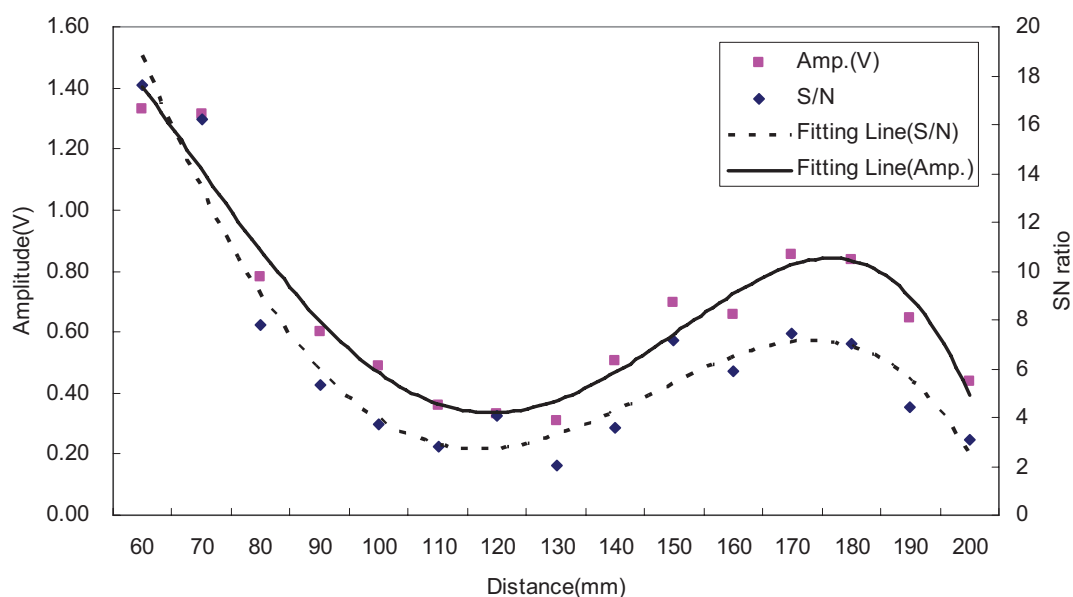


**Fig. 5.4.2-3 Comparison of two defect identification methods for a 50 mm thick plate. The results using the previous method are denoted by the beam angle  $\theta$ . The new method, in which the beam angle  $\theta'$  is calculated from the FFT peak of the reflected wave, offers greater accuracy. It can also be seen that identification accuracy increases at greater distances for both methods.**

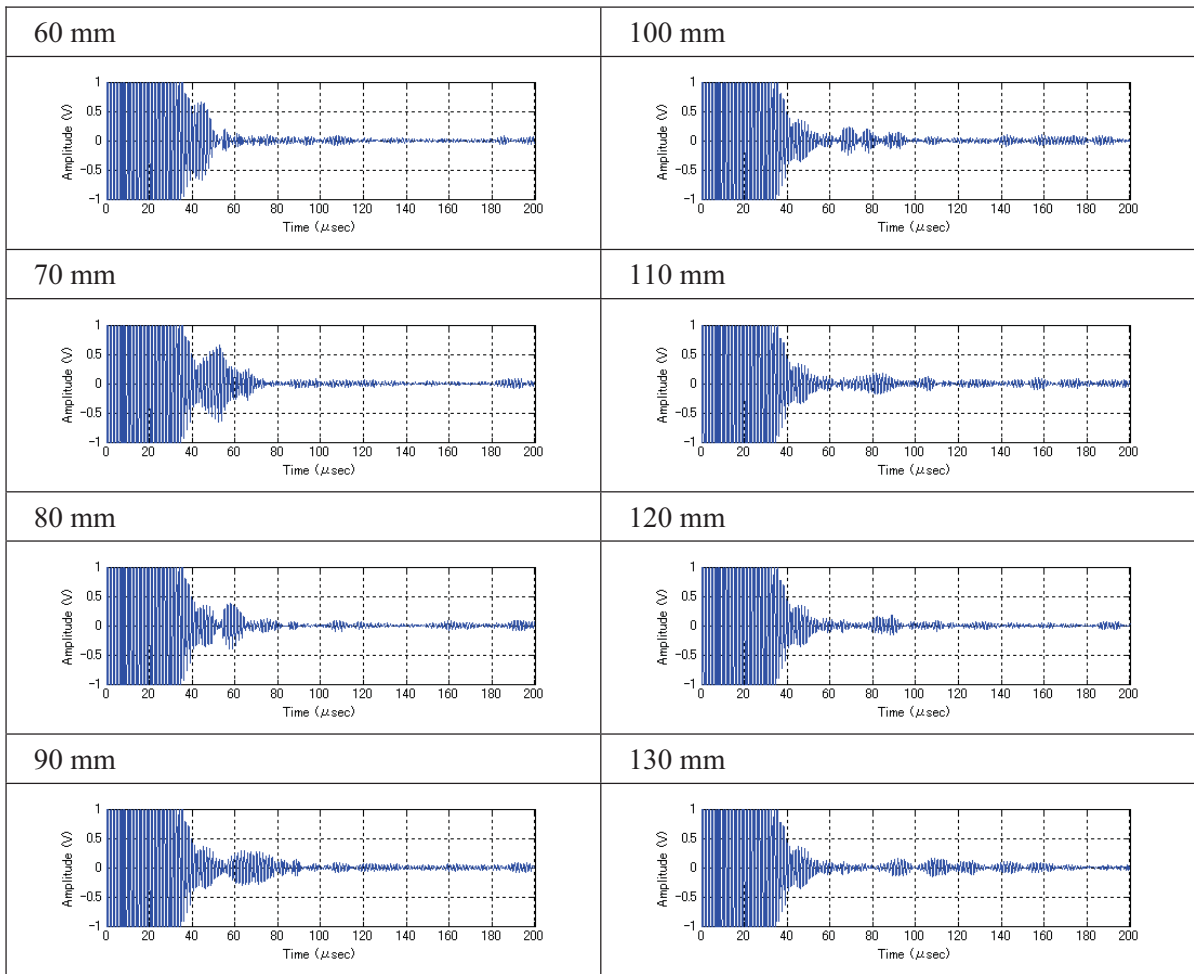
**Table 5.4.2-2 Comparison of the distance calculations using both the current and new identification methods for the beam angle.**

Distance (mm)	Calc. distance using $\theta$	Error (A)	Calc. distance using $\theta'$	Error (B)	A-B
50	67.61	17.61	58.57	8.57	9.04
55	73.19	18.19	64.22	9.22	8.97
60	78.09	18.09	66.24	6.24	11.85
65	80.50	15.50	71.56	6.56	8.94
70	83.78	13.78	74.48	4.48	9.3
75	87.58	12.58	79.41	4.41	8.17
80	90.97	10.97	83.60	3.60	7.37
85	94.69	9.69	89.03	4.03	5.66
90	98.19	8.19	91.27	1.27	6.92
95	104.23	9.23	99.14	4.14	5.09
100	106.87	6.87	102.37	2.37	4.5
105	111.33	6.33	106.39	1.39	4.94
110	115.48	5.48	111.14	1.14	4.34
115	120.15	5.15	116.73	1.73	3.42
120	124.30	4.30	119.91	-0.09	4.39
125	127.16	2.16	124.43	-0.57	2.73
130	132.22	2.22	129.38	-0.62	2.84
135	136.01	1.01	134.05	-0.95	1.96
140	139.61	-0.39	137.60	-2.40	2.01
145	144.90	-0.10	143.85	-1.15	1.05
150	148.13	-1.87	146.36	-3.64	1.77

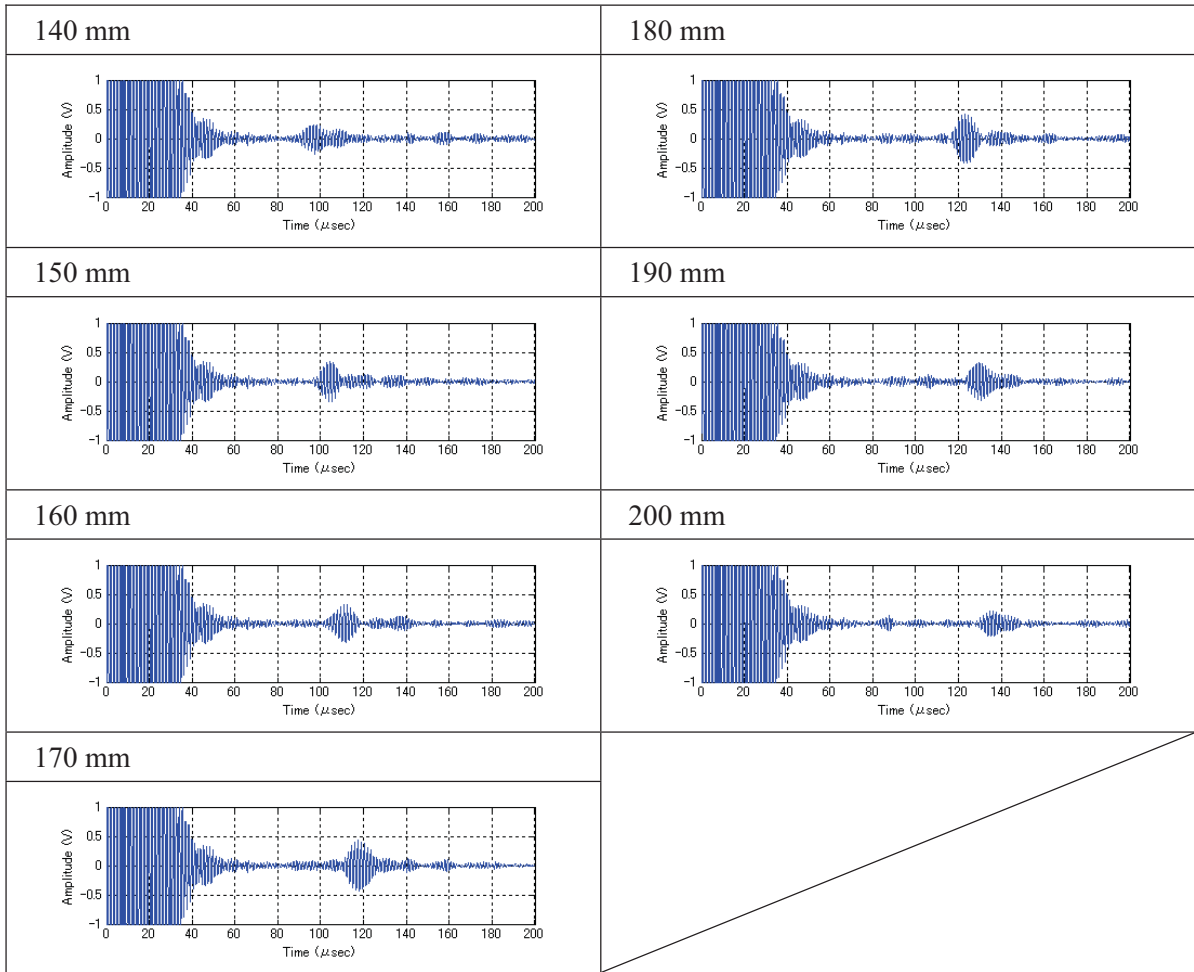
図 5.4.2-4 は、板厚 14.3mm における距離と振幅、S/N の関係である。生波形を図 5.4.2-5 に示し、このときの関係する値を表 5.4.2-3 に示す。なお、表 5.4.2-3 には後述する欠陥同定方法の新提案を検証するために式 5.4.2-1 で求められる屈折角  $\theta'$  を記載している。図 5.4.2-3 より、距離 190mm で受信振幅は最大となり、距離 170mm で S/N が最高になる。そこで、モニタリングに利用する距離は 170mm とする。170mm は超音波の路程で考えると約 3.5skip に相当する。通常、直接反射となる 0.5skip が最も受信感度が高いはずであるが、EMAT は超音波のビーム幅が広いため、薄板の場合、近距離音場に入り込んでしまい、正確な測定ができない。そこで、薄板のモニタリングに利用する距離は 170mm とする。



**Fig. 5.4.2-4 Distance-amplitude characteristic test for a 14.3 mm thick plate. Signal amplitude peaks at 180 mm, whereas the optimum S/N ratio is obtained at 170 mm.**



**Fig. 5.4.2-5 (1/2) Raw waveform of the detection signal for different testing distances. Longer distances require longer detection times Between 60 and 90 mm detection is not possible because the defect signal is mixed with other signals.**

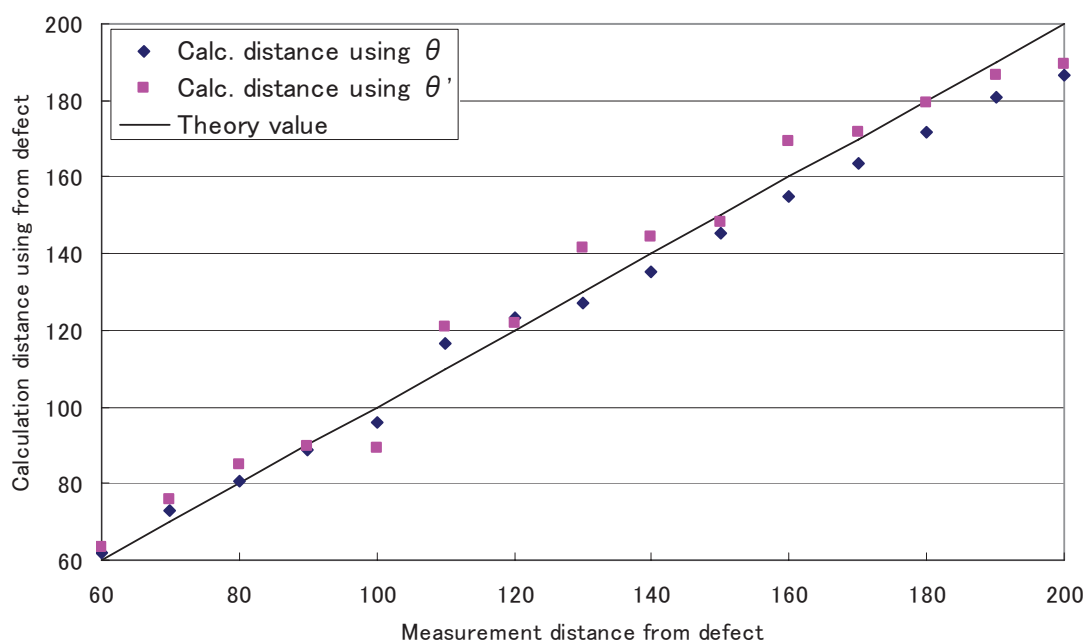


**Fig. 5.4.2-5 (2/2) Raw waveform of the detection signal for different testing distances. Longer distances require longer detection times. From 150mm to 190mm the defect signal can be clearly identified. S/N ratio is especially good for 170mm and 180mm.**

**Table 5.4.2-3 Measurements at different distances (14.3mm thick plate)**

Distance (mm)	Amp. (V)	Noise (V)	S/N	Pear Freq. (kHz)	Peak time ( $\mu$ sec)	Angle $\theta'$ (deg)
60	1.33	0.08	17.63	679.86	44.40	66.61
70	1.31	0.08	16.20	674.87	52.61	67.61
80	0.78	0.10	7.78	664.87	57.96	69.81
90	0.60	0.11	5.34	689.86	63.73	64.76
100	0.49	0.13	3.70	749.85	68.89	56.32
110	0.36	0.13	2.80	674.87	83.74	67.61
120	0.33	0.08	4.08	709.86	88.75	61.53
130	0.31	0.15	2.04	629.87	91.59	82.17
140	0.50	0.14	3.59	654.87	97.23	72.34
150	0.70	0.10	7.16	684.86	104.39	65.66
160	0.65	0.11	5.93	641.54	111.55	76.60
170	0.85	0.11	7.44	668.20	117.78	69.05
180	0.84	0.12	6.99	669.87	123.46	68.67
190	0.64	0.14	4.45	679.86	130.14	66.61
200	0.44	0.14	3.09	689.86	134.29	64.76

図 5.4.2-6 は、2.2.4 節で板厚 50mm で幅 25mm、深さ 20%t の欠陥に対し、水平距離を移動させた際の欠陥位置同定結果について提案した新しい欠陥同定手法と従来手法の比較である。表 5.4.2-4 は、それぞれの測定値をまとめたものである。励磁周波数により屈折角を求めるのではなく、受信波形を FFT 解析し、その際のピーク周波数を用いて屈折角  $\theta'$  を求めて、従来手法と同様に超音波の路程を計算により求めた。従来手法と新手法を比較すると同程度の精度で測定できることが確認できた。配管の様に薄板の場合、超音波路程も短いため厚板に比べて相対的に誤差が小さくなるものと考ええる。



**Fig. 5.4.2-6 Comparison of two defect identification methods for a 14.3 mm thick plate. The results using the previous method are denoted by the beam angle  $\theta$ . The new method, in which the beam angle  $\theta'$  is calculated from the FFT peak of the reflected wave, offers greater accuracy. It can also be seen that identification accuracy increases at greater distances for both methods.**



**Table 5.4.2-4 Comparison of the distance calculations using both the current and new identification methods for the beam angle.**

Distance (mm)	Calc. distance using $\theta$	Error	Calc. distance using $\theta'$	Error
60	61.71	1.71	63.57	3.57
70	73.13	3.13	75.89	5.89
80	80.56	0.56	84.86	4.86
90	88.58	-1.42	89.92	-0.08
100	95.75	-4.25	89.43	-10.57
110	116.40	6.40	120.79	10.79
120	123.36	3.36	121.70	1.70
130	127.31	-2.69	141.55	11.55
140	135.15	-4.85	144.53	4.53
150	145.10	-4.90	148.38	-1.62
160	155.06	-4.94	169.29	9.29
170	163.71	-6.29	171.59	1.59
180	171.61	-8.39	179.41	-0.59
190	180.89	-9.11	186.34	-3.66
200	186.65	-13.35	189.49	-10.51

### 5.4.3 欠陥検出性試験

5.4.2 節までで決定した条件を用いて、欠陥モニタリング用のダブルコイル EMAT の欠陥検出性を評価する。表 5.4.3-1 は、5.4.2 節までの議論の結果得られた試験条件である。図 5.4.3-1 と 5.4.3-2 は、板厚 14.3mm、幅 12.5mm、深さ 20%t と 50%t の受信波形である。図 5.4.3-3 と 5.4.3-4 は、板厚 14.3mm、幅 25mm、深さ 20%t と 50%t の受信波形である。図 5.4.3-5 は、それぞれの欠陥の受信ピークレベルと S/N をプロットしたものである。欠陥の幅が大きくなるほど、欠陥深さが深くなるほど受信ピークが大きくなることがわかる。また、従来研究の EMAT による欠陥検出目標は板厚 50%t 深さの欠陥を S/N が 2 以上で検出すること[X2、T11]であることを考えると、幅 12.5mm、深さ 20%t の欠陥を S/N4 以上で検出しているため、受信感度は十分であり、配管モニタリングに利用できると考える。

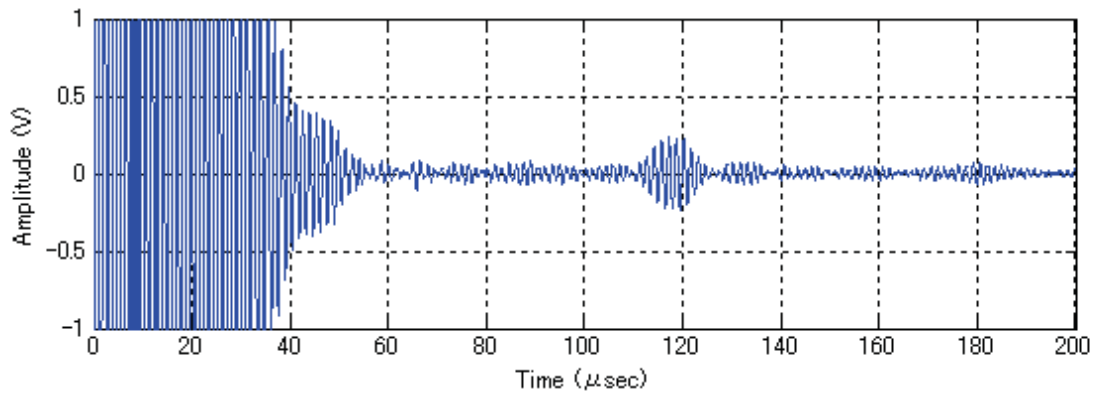
次に図 5.4.3-6 から 5.4.3-8 は、板厚 50mm、幅 12.5mm、深さ 5、10、20%t の受信波形である。図 5.4.3-9 は、さらに深さ 75%t を加えた受信ピークレベルと S/N をプロットしたものである。深さに応じて信号も S/N も大きくなることがわかる。深さ 5%t と 10%t は評価上は検出されているが、肉眼で見た際にピークは判別しにくい。しかし、幅 12.5mm、20%t は判別可能である。保守的に評価して、20%t までの欠陥はモニタリング可能であると考ええる。

図 5.4.3-10 から 5.4.3-12 は、板厚 50mm、幅 25mm、深さ 5、10、20%t の受信波形である。図 5.4.3-9 は、さらに深さ 75%t を加えた受信ピークレベルと S/N をプロットしたものである。深さに応じて信号も S/N も大きくなることがわかるが、75%t では逆に小さくなっている。受信信号だけに着目した場合、20%t 以上の深さでは超音波の反射量が飽和したと考える。超音波はある幅をもって照射されており、反射面積がその幅に達すると反射量は飽和する。幅 25mm と

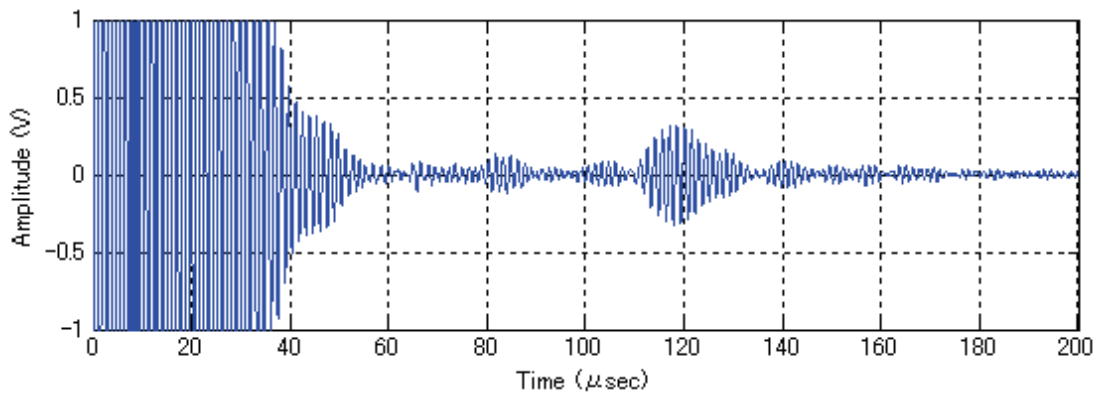
なったため 12.5mm の場合に比べ、浅い深さで飽和したと考える。大きな欠陥のサイジングには課題が残るものの、欠陥モニタリングとしては利用可能である。これも保守的に評価して、幅 12.5mm、深さ 20%t までのモニタリングには利用可能である。

**Table 5.4.3-1 Defect detection test conditions**

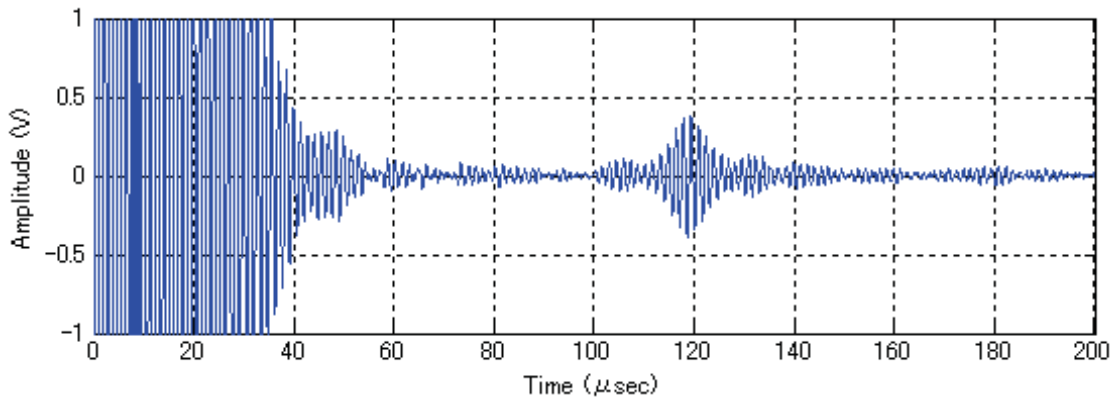
Thickness (mm)	Frequency (kHz)	Distance (mm)	Burst number	Exciting voltage (V)	Specimens EDM Slit size (W : mm)
14.3	680	170	5	1500	W25×20, 50 %t W12.5×20, 50%t
50	680	100	3	1500	W25×5,10,20,75%t W12.5×5,10,20,75%t



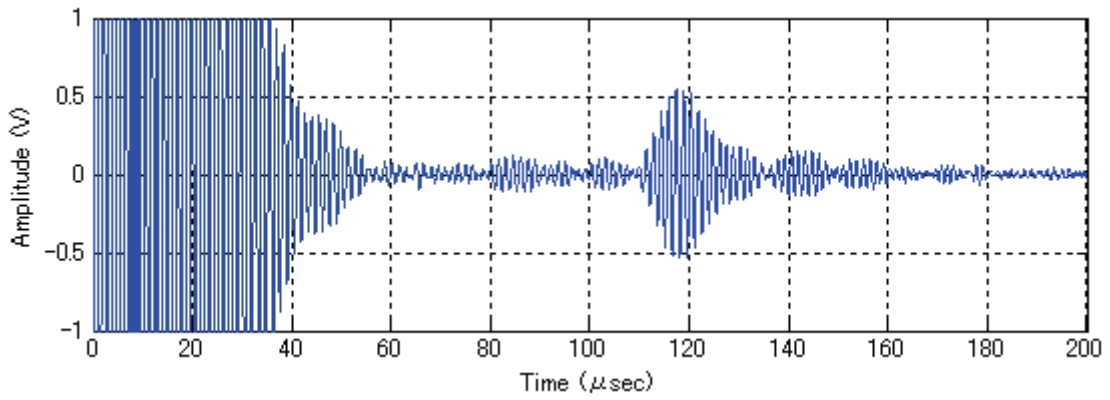
**Fig. 5.4.3-1 Test waveform for a 14.3mm thick plate with a W12.5 mm×20%t defect at 170 mm distance.**



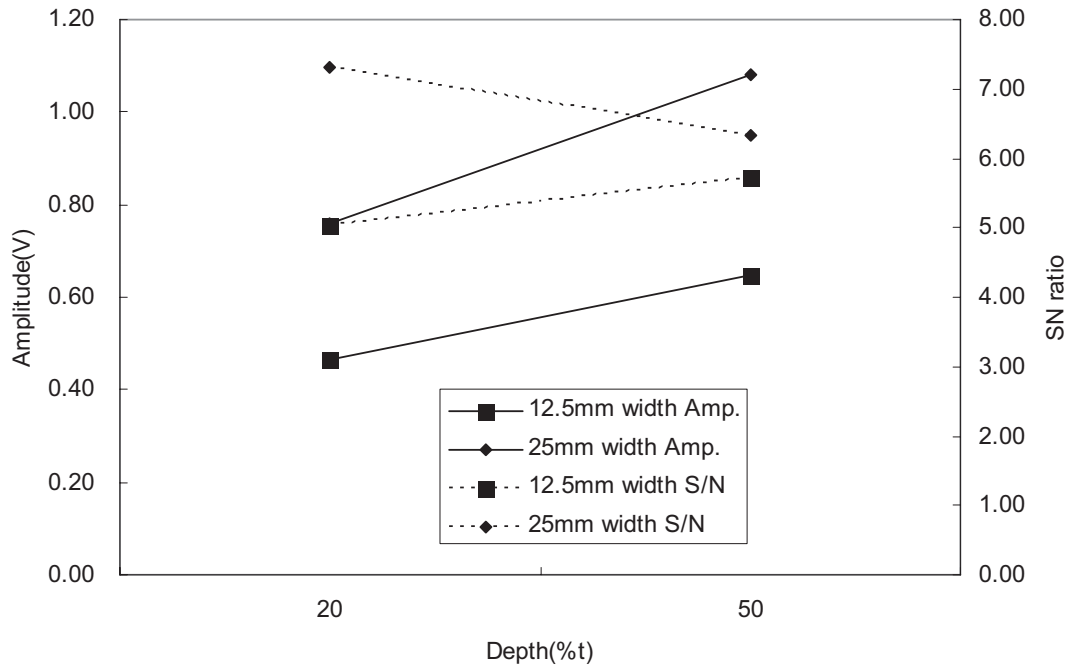
**Fig. 5.4.3-2 Test waveform for a 14.3mm thick plate with a W12.5 mm×50%t defect at 170 mm distance.**



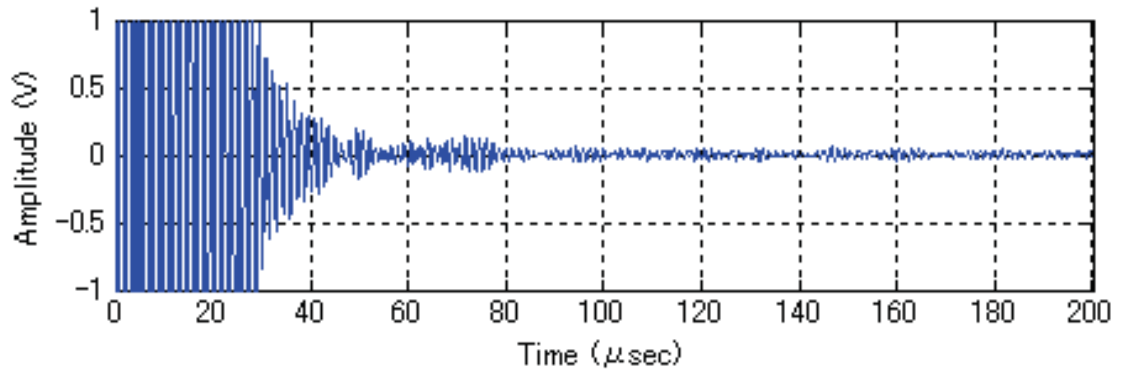
**Fig. 5.4.3-3 Test waveform for a 14.3mm thick plate with a W25 mm×20%t defect at 170 mm distance.**



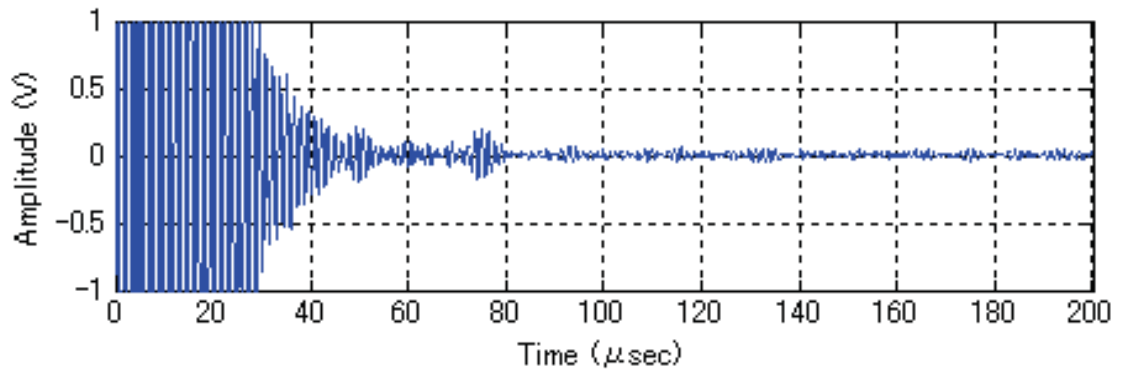
**Fig. 5.4.3-4 Test waveform for a 14.3mm thick plate with a W25 mm×50%t defect at 170 mm distance.**



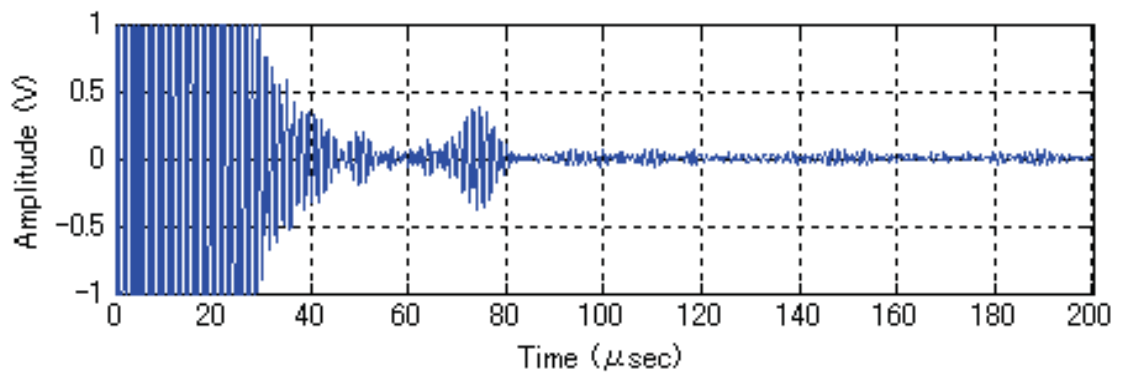
**Fig. 5.4.3-5 Larger defects produce larger maximum signal amplitude and better S/R ratios.**



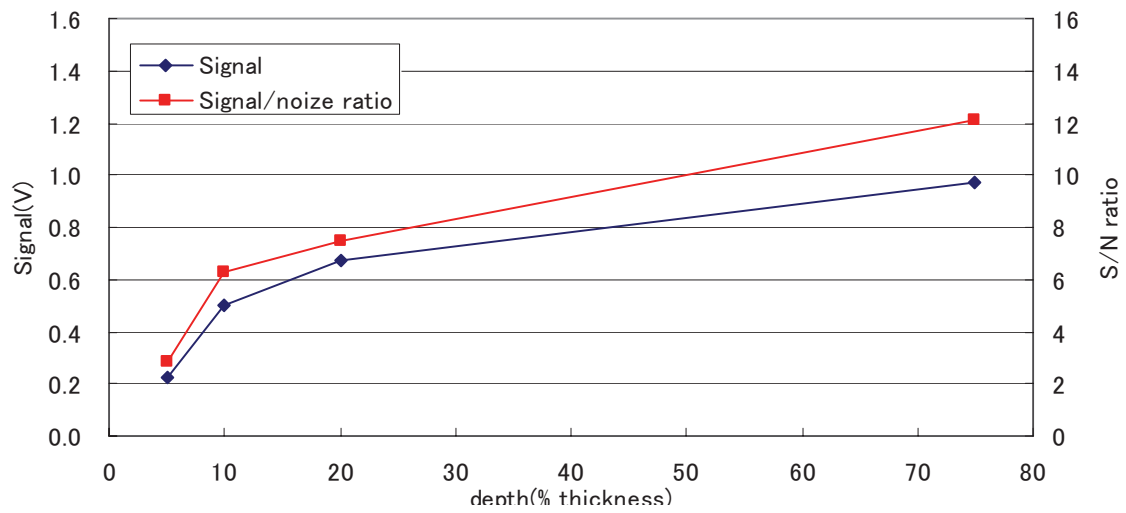
**Fig. 5.4.3-6** Test waveform for a 50 mm thick plate with a W12.5 mm×5%t defect at 100 mm distance.



**Fig. 5.4.3-7** Test waveform for a 50 mm thick plate with a W12.5 mm×10%t defect at 100 mm distance.

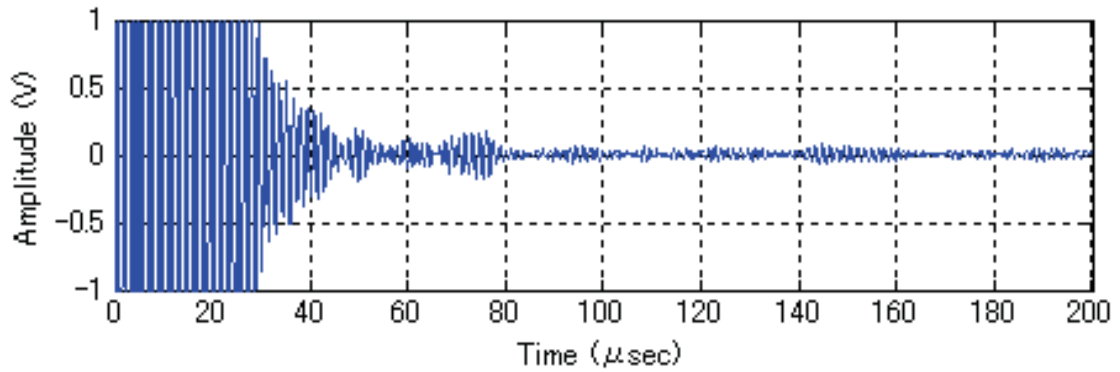


**Fig. 5.4.3-8** Test waveform for a 50 mm thick plate with a W12.5 mm×20%t defect at 100 mm distance.

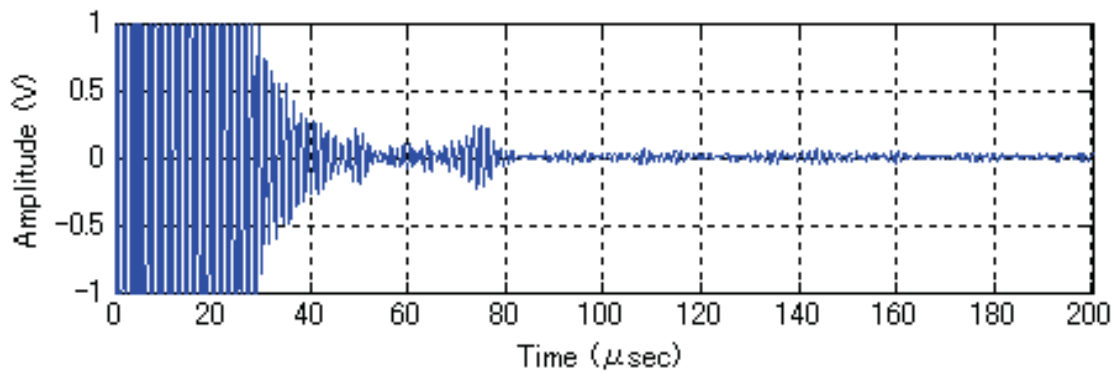


**Fig. 5.4.3-9 Larger defects produce larger maximum signal amplitude and better S/R ratios [T18\*].**

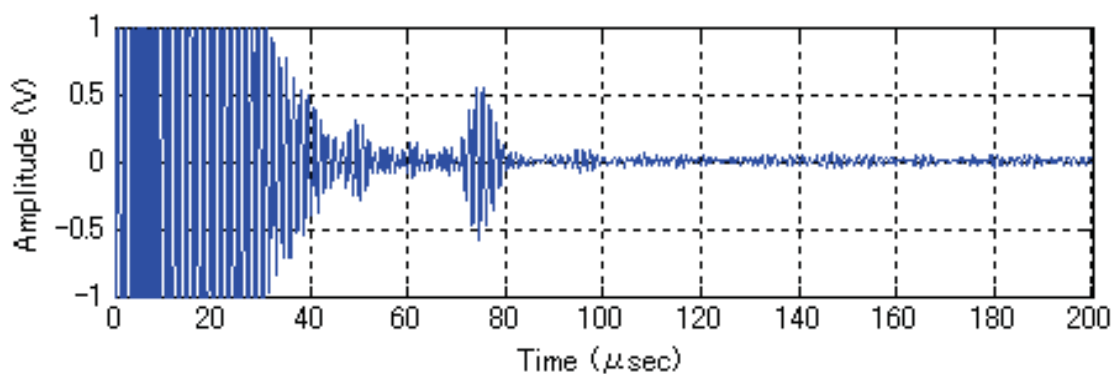




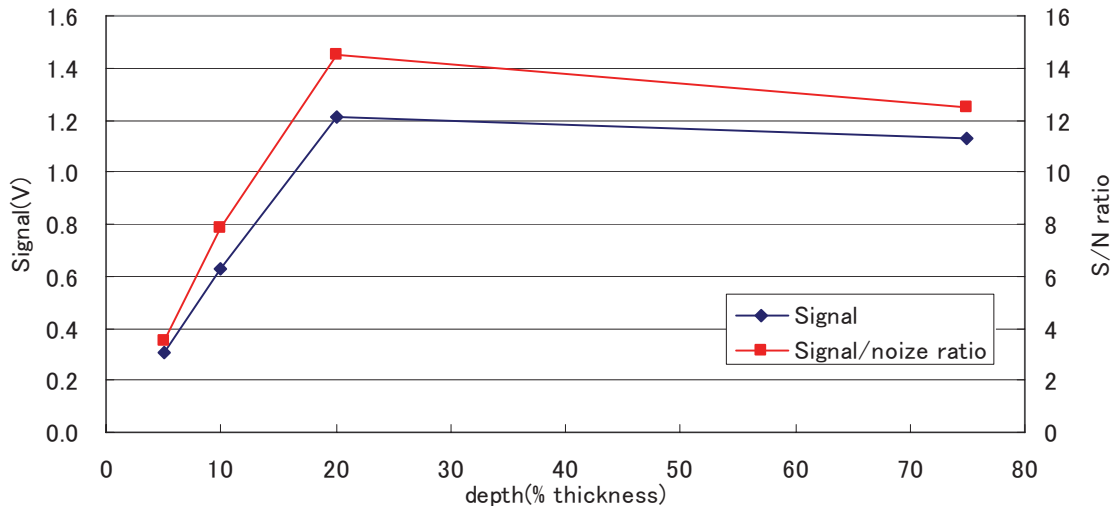
**Fig. 5.4.3-10** Test waveform for a 50 mm thick plate with a W25 mm×5%t defect at 100 mm distance.



**Fig. 5.4.3-11** Test waveform for a 50 mm thick plate with a W25 mm×10%t defect at 100 mm distance.



**Fig. 5.4.3-12** Test waveform for a 50 mm thick plate with a W25 mm×20%t defect at 100 mm distance.



**Fig. 5.4.3-13 In general larger defects produce larger maximum signal amplitude and better S/R ratios. Some saturation is nonetheless observed for too deep effects [T18\*].**

#### 5.4.4 従来研究との比較

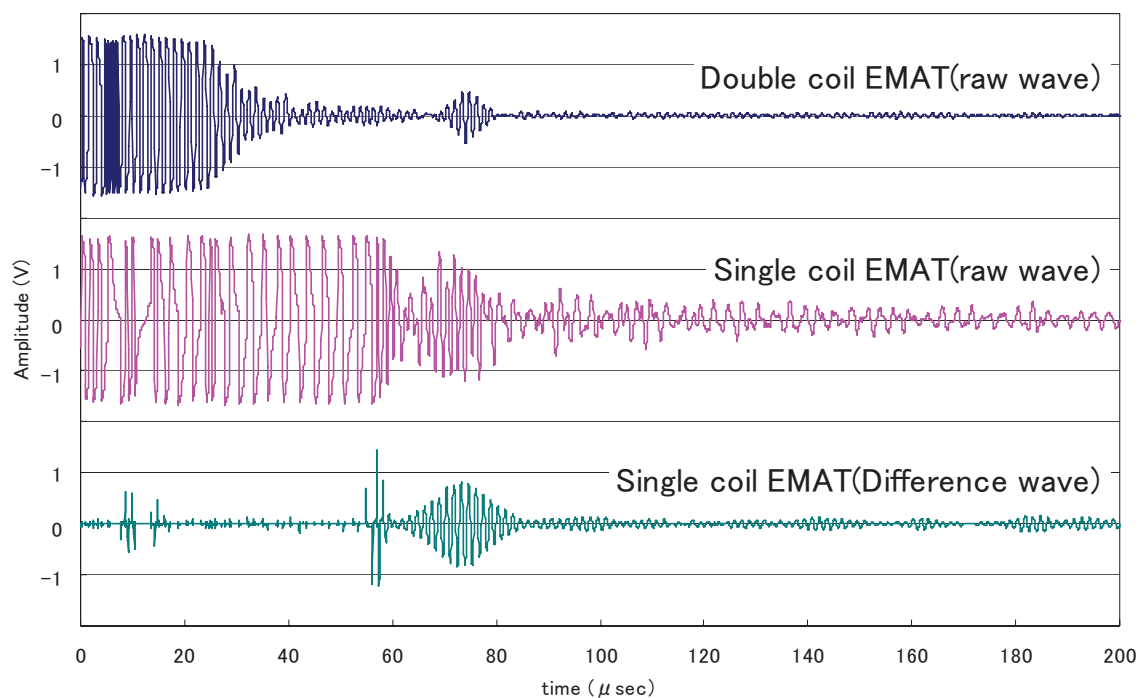
5.4.3 節までで、ダブルコイル EMAT で欠陥検出可能であり、定点設置によるモニタリングが可能であることを検証した。本節では、従来のシングルコイル EMAT と比較を行う。図 5.4.4-1 と 5.4.4-2 は、ダブルコイル EMAT、シングルコイル EMAT の生波形、シングルコイル EMAT の差分処理後の波形を比較したものである。いずれも、板厚 50mm、距離 100mm、EDM スリットは幅 25mm、深さ 10%t である。励磁周波数は従来研究であるシングルコイル EMAT に合わせて 650kHz、700kHz と 750kHz バースト数 2 波とした。

ダブルコイル EMAT の波形とシングルコイル EMAT の生波形を比較する。どちらも定点観測した場合を模擬しているという意味で条件は同じである。まず、75  $\mu$  sec 近辺に欠陥信号が確認されるが、シングル EMAT では、その直前まで不感帯が存在する。このことから、100mm より近づけて観察することが困難であることを示している。次に、信号のピークレベルはシングルコイル EMAT の方が大きい。これは、同じ大きさの Halbach 磁石構造の全面を使って超音波の発受信を行うシングルコイル EMAT に比べ、ダブルコイル EMAT は半分ずつを送受信で分けているため、磁束密度がシングルコイル EMAT に比べ弱くなると考える。しかし、ノイズレベルはダブルコイル EMAT の方が小さい。これは、送受信コイルを分けたことで、渦電流による干渉がノイズとなるシングルコイル EMAT に比べノイズ源を抑制することができたためであると考えられる。欠陥検出には欠陥信号のピークレベルより S/N が重要であるため、ダブルコイル EMAT は十分モニタリングに利用できると思われる。

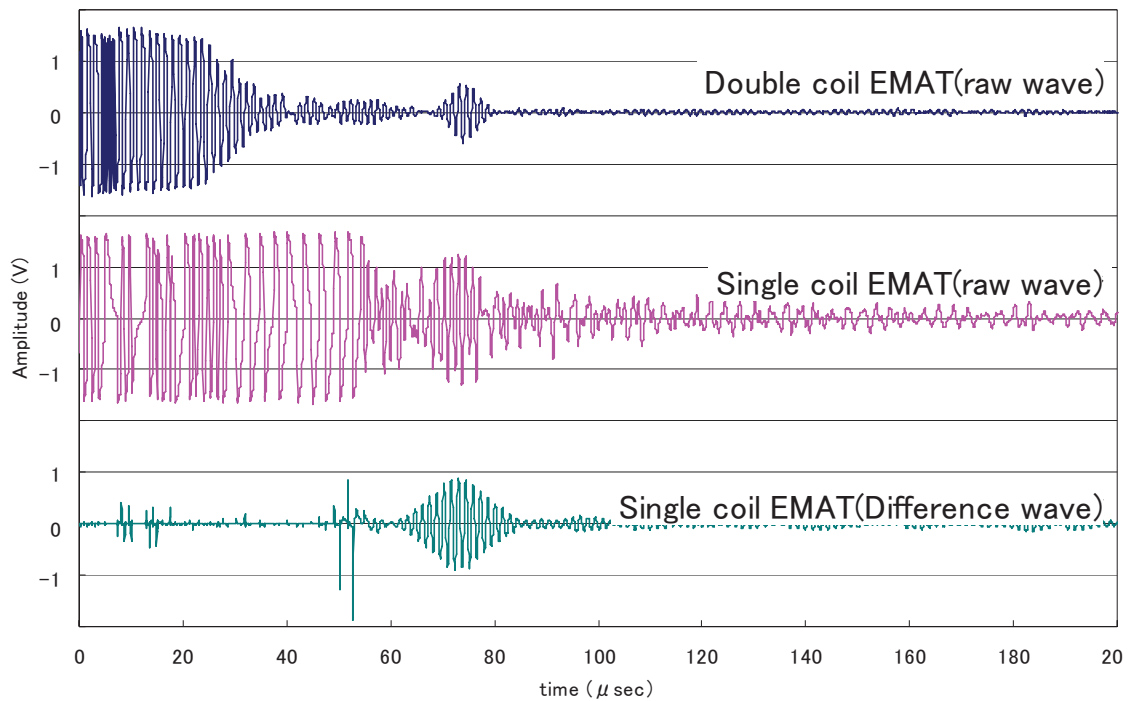
次に、ダブルコイル EMAT とシングルコイル EMAT の差分処理波形を比較する。本差分波形は、EMAT を機械的に反波長分移動させ、その信号を差分することでノイズをキャンセルする技術である[X2]。不感帯が消え、ノイズレベルもダブ

ルコイル EMAT 程度に抑えられ、欠陥信号の判別が容易である。

ここで、励磁周波数 750kHz で検出した信号も合わせて、その欠陥信号ピークレベルと S/N を比較したのが、表 5.4.4-1 である。欠陥信号ピークレベルは、シングルコイル EMAT で差分処理したものが約 1.7 倍大きい S/N はいずれの周波数でもダブルコイル EMAT の方が大きい。このことから、機械的スキャン機構を有しなくともダブルコイル EMAT はモニタリングに利用できることがわかった。



**Fig. 5.4.4-1 Comparison of the defect signal for the double coil EMAT, the single coil EMAT and the differential single coil EMAT. Differential processing requires a mechanical scan. Excitation frequency is 650 kHz in all cases.**



**Fig. 5.4.4-2 Comparison of the defect signal for the double coil EMAT, the single coil EMAT and the differential single coil EMAT. Differential processing requires a mechanical scan. Excitation frequency is 700 kHz in all cases.**

**Table 5.4.4-1 Comparison between Double coil EMAT and Differential Single coil EMAT signals.**

Frequency	Double coil		Single coil & Difference	
	Amp.(V)	S/N ratio	Amp.(V)	S/N ratio
650	0.999	7.342	1.635	6.181
700	1.000	11.1	1.726	7.845
750	1.049	6.836	1.656	5.577

## 5.5 結言

本章では、欠陥モニタリング用 EMAT の研究を行うためにダブルコイル EMAT の研究を行った。既存研究では、欠陥検出を行う際に EMAT を機械的にスキヤニングする必要があった。しかし、モニタリングに用いる場合、機械的スキヤニングはできない、もしくは、機械的スキヤニングを行う場合、スキャン機構が必要であることから、コストが高くなり実現性が低くなる。

そこで、磁束密度が PPM 構造の約 1.4 倍、送受信として約 2 倍になる Halbach 構造を磁石構造として採用し、コイルをダブルコイル型とした EMAT を考案した。通常、超音波の送受信はコイル 1 つの EMAT で可能であるが、ダブルコイル化し送信用コイルと受信用コイルを設けることで、送信、受信時に干渉信号として現れるノイズを軽減することができ、機械スキヤニングを行わなくても欠陥信号を検出することが可能であることがわかった。本章内での確認は行っていないが、第 3 章、第 4 章同様に配管温度はコイルでも測定可能であることからハイブリッドセンシングを行うことが可能である。

ダブルコイル EMAT を用いて、第 2 章で説明した新しい欠陥同定法の検証を行った。まず、使用するバースト波数と励磁周波数を確認した。バースト波数が多くなるほど受信感度は高くなるが、その分不感帯も大きくなることから、近距離音場での測定を必要とする薄い板厚での検出を想定しバースト波数を決定した。

次に、発信周波数による受信感度を確認したところ、680kHz 近辺が最大であったことから、680kHz を励磁周波数に選定した。これは、屈折角としては 66.6 度に相当する。新しい欠陥同定法では、発信時に最大音圧を出す、中心音場の屈折角ではなく、受信波形を FFT により周波数解析を行い、その最大強度である周波数から屈折角を算出し用いる。本手法を用いたセンサの特性把握のため

の試験として、距離振幅特性と欠陥検出性試験を実施した。

その結果、欠陥モニタリング用 EMAT は圧力容器板厚に相当する 50mm と配管に相当する 14.3mm に対し、幅 12.5mm、深さ 20%に相当する欠陥を S/N2 以上で検出できることを確認した。従来法と比較を行っても検出感度は低いが S/N は高いことがわかった。欠陥同定精度についても厚板の場合、最大 11mm 以上の改善が得られた。

よって、ダブルコイル EMAT により新欠陥同定法を用いれば、圧力容器や配管の欠陥モニタリングが可能であることを示した。

## 第 6 章

### 結論

本論文では原子力発電所の動脈とも言える静的機器の冷却系配管を対象とした局所モニタリング手法の研究を行った。モニタリング対象は軽水炉でも高速炉でも同じ環境である水・蒸気系配管を選び、配管減肉、配管温度、配管内流体温度、き裂欠陥の 4 種類をモニタリング対象とした。冷却系配管の局所モニタリング技術の研究に際し、次の 4 つの課題を解決した。

1 つ目は、放射性廃棄物を出さない手法を選定することである。そこで、本論文は高温測定可能で接触媒質が不要な電磁超音波探触子(EMAT: Electromagnetic acoustic transducer)を用いた研究を行った。

2 つ目は、高温環境中でも高精度で測定できることである。そこで、新しい測定手法を提案し有効性を検証した。第 3 章で減肉モニタリング用 EMAT は提案したパルスエコー共振(PER)法により 200°C の高温環境下でも高精度な測定を行うことを確認した。従来の EMAT によるパルスエコー(PE)法の測定精度は  $4 \pm 0.3\text{mm}$  であった。しかし、PER を用いた場合、炭素鋼、ステンレス鋼ともに  $2 \pm 0.1\text{mm}$  以下の測定精度で減肉測定可能であることを確認した。第 4 章では磁石ノイズを除去できる構造に変更することで、磁石ノイズフィルタがなくとも 200°C で  $2\text{mm} \pm 0.03\text{mm}$  と精度向上が図られた。また、第 5 章では欠陥モニタリング用 EMAT について、モニタリング可能なダブルコイル EMAT を提案した。圧力容器板厚に相当する 50mm と配管に相当する 14.3mm の板厚に対し、幅 12.5mm、深さ 20% に相当する欠陥を信号対ノイズ比 2 以上で検出できることを確認した。従来研究されてきた、欠陥検出用 EMAT は機械的スキャンが必要であった。しかし、EMAT 設置に大きなコストが発生し、装置自体も大きくなる



ためモニタリングを行うには機械的スキャンはできない。そこで、従来研究されていたシングルコイル型 EMAT ではなく送受信を分割したダブルコイル型 EMAT を研究した。磁石構造は従来の磁石構造である PPM 構造より 1.4 倍の磁束密度になる Halbach 構造を採用した。また、欠陥同定法に用いる超音波の屈折角は受信波を周波数分析したピーク周波数を用いて算出する手法を用いることで同定精度が向上することが確認できた。

3 つ目は、原子炉運転中温度に耐えることである。耐熱性だけでなく 18 ヶ月の連続運転に耐えることができる耐久性も要求される。

第 3 章で EMAT の 200°C の高温特性試験と 18 ヶ月に余裕をみた高温耐久性試験を行った。その結果、温度 150°C 以上では磁石によるノイズが大きくなることがわかり、磁石ノイズを除去するフィルタが必要であることがわかったが、15000 時間(21 ヶ月)以上の高温耐久性が確認された。

4 つ目は、より多くの情報が 1 つのセンサで得られることができればプラント診断を行う際に経済的に合理的かつ高精度に測定できるということである。そこで、1 つのセンサで複数の物理量を測定できるハイブリッドセンシングを提案、検証した。検証対象は、第 4 章で配管表面温度、配管減肉量および内部流体温度を測定対象とするハイブリッドセンシング用 EMAT である。この 3 つの物理量を 1 組の EMAT で測定するが、縦波と横波を同時に送受信するためにセンサデザインの見直しを行い、各物理量を試験で測定することで成立性を確認した。配管表面温度計は、EMAT コイルに流れる直流抵抗値の変化を測定することで測定する。試験の結果、実際の配管表面温度と EMAT コイルの直流抵抗値の間に決定係数として 0.99 以上の一致を確認することができた。次に配管減肉は高温での磁石ノイズ低減化を図った結果、 $2\text{mm} \pm 0.03\text{mm}$  の精度で測定可能であることを確認した。最後に内部流体として 90°C までの水温の測定試験を行った。

水中の超音波受信波形は合成波であるため、基準波形と受信波形の相関係数を求めることで受信位置を把握し、音速変化を温度に変換することで水温測定が可能であることを確認した。ハイブリッドセンシングのメリットは、同一箇所でも測定できることである。通常、他の場所に別途温度計を設置するか補償銅線が必要であるが、ハイブリッドセンシング EMAT の場合、場所に依存する精度誤差はない。また、自ら温度を測定するため、温度補正を 1 つのセンサで行うことが可能である。これは多くのデータをマルチモーダルに検出したいプラント診断には重要である。また、EMAT 部品の各価格は安価であり、1 プラントあたり数千から数万の設置を必要とする実際のプラント適用を考慮した場合経済的にも優位である。スケールメリットを考えた場合、一つのセンサは、約 10 ドル以下で製造できると推算した。

第 3 章、第 5 章で試作した EMAT でもコイルの直流抵抗を測定することで温度は求められるためハイブリッドセンシング化が可能である。

本論文は、上記 4 つの課題を全て解決した。今後、配管のヘルスマモニタリングを実施するには、センシングによる状態変化の把握と減肉やき裂の進展具合の予測、予測から導かれる補修を含めた保全方法の確立が必要である。本論文はこの中のセンシングによる状態変化の把握を可能とするセンサ技術の研究を実施した。研究の結果、モニタリングに適用可能なセンサと測定手法を提案し、試験により検証することができた。今後は、減肉や欠陥の進展予測法や補修方法の研究が必要である。

## 謝辞

本論文は筆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に在籍中の研究成果をまとめたものである。同専攻小島史男教授には指導教官として本研究実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始、ご指導を戴いた。ここに深謝の意を表す。また、本研究に多大なご助言を頂いた、同専攻的場修教授、機械工学専攻の阪上隆英教授に対して感謝の意を表す。本研究の第3章と第5章の実験では株式会社 FTEC の藤木一成氏に試験の協力をして戴くとともに有益なご助言を戴いた。ここに同氏に対して感謝の意を表す。また、独立行政法人日本原子力研究開発機構山下卓哉技術主席、上田雅司副主任研究員、ミハラケ オビディウ博士、ダニエル. G. ロドリゲス氏には、本研究に際し多くのご助言を戴いた。ここに同氏らに対して感謝の意を表す。

## 参考文献

### A

[A1] G. A. Alers and L. R. Burns, “EMAT Design for Special Applications”, *Material Eval.*, 45, pp.1184-1189 (1987)

[A2] A. B. Auld, “Acoustic Fields and Waves in Solids”, John Wiley & Sons, New York (1973)

[A3] A. Tagawa, M. Ueda and T. Yamashita, “Development of the ISI Device for Fast Breeder Reactor MONJU Reactor Vessel”, *Journal of Power and Energy Systems Vol.1 No.1 Special Issue on 14th International Conference on Nuclear Engineering I*, pp.3-12 (2007)

[A4] B. Ahn, S. S. Lee, S. T. Hong, H. C. Kim, S. L. Kang, “Application of the acoustic resonance method to evaluate the grain size of low carbon steels”, *NDT&E International*, 32, pp.85-89 (1999)

[A5] Y. Akimune, H. Tsuda, J. Takatsubo, “Hybrid sensing technology and diagnostic technology”, *Proceedings of the Japan society of mechanical engineering*, pp.307-308 (2004)

### B

[B1] M. L. Buess and G. L. Peterson, “Acoustic Ringing Effects in Pulsed Nuclear Magnetic-Resonance Probes”, *Rev. Sci. Instrum.*, 49, pp.1151-1155 (1978)

[B2] R. E. Beissner, “Electromagnetic-Acoustic Transducers: A Study of the State of the Art”, Southwest Research Institute, Report NTIAC-76-1 (1976)

## C

[C1] A. V. Clark, C. M. Fortunko, M. G. Lozev, S. R. Schaps and M. C. Renken, “Determination of Sheet Steel Formability Using Wide Band Electromagnetic-Acoustic Transducers”, Res. Nondest. Eval., 4, pp.165-182 (1992)

[C2] Chikazumi, “Physics of Magnetizm”, (Wiley-Interscience, New York) (1964)

## D

[D1] J. Degrieck, W. De Waele and P. Verleysen, “Monitoring of fibre reinforced composites with embedded optical fibre Bragg sensors, with application to filament wound pressure vessels”, NDT & E International, Volume 34, Issue 4, pp.289-296 (2001)

## F

[F1] S. A. Filimonov, B. A. Budenkov and N. A. Glukhov, “Ultrasonic Contact- less Resonance Testing Method”, Soy. I Nondestruct. Test. (translated from Defektoskopiya), No.1, pp.102-104 (1971)

[F2] H. Fukuoka, M. Hirao, T. Yamasaki, H. Ogi, G. L. Petersen and C. M. Fortunko, “Ultrasonic Resonance Method with EMAT for Stress Measurement in Thin Plate”, in Rev. of Progress in QNDE, Vol.12, pp.2129-2136 (1993)

[F3] C. M. Fortunko, G. L. Petersen, B. B. Chick, M. C. Renken and A. L. Preis, “Absolute measurement of Elastic-wave phase and group velocities in lossy materials”, Rev. Sci. Instrum, 63, pp.3477-3486 (1993)

## G

[G1] M. R. Gaerttner, W. D. Wallace and B. W. Maxfield, "Experiments Relating to the Theory of Magnetic Direct Generation of Ultrasound in Metals", Phys. Rev., 184, pp.702-704 (1969)

[G2] M. Greenspan and C. E. Tschiegg "Tables of the speed of sound in water," J. Acoust. Soc. Am. 31, pp.75-76 (1959)

[G3] 原子力安全・保安院, "保全プログラムを基礎とする検査の導入について" (2008)

[G4] V. A. Del Grosso and C.W. Mader (1972), "Speed of sound in pure water", J. Acoust. Soc. Am. 52, pp.1442-1446

## H

[H1] M. Hirao, H. Ogi and H. Fukuoka, "Resonance EMAT System for Acoustoelastic Stress Evaluation in Sheet Metals", Rev. Sci. Instrum., 64, pp.3198- 3205 (1993)

[H2] M. Hirao, H. Ogi, "EMATs for science and industry - noncontacting ultrasonic measurements-", pp.20-21 (2003)

[H3] K. Halbach, J. Chin, E. Hoyer, H Winick, R. Cronin, J. Yang and Y. Zambre, "A Permanent Magnet Undulator for SPEAR," IEEE Transactions on Nuclear Science Vol. 28, pp.3136-3138 (1981)

[H4] 早野洋史, 三田彰, "H FBG ハイブリッドセンサの提案とその活用による構造損傷検知手法に関する研究", 日本地震工学会論文集 第6巻, 第1号, pp.1-10 (2006)

[H5] M. Hirao, H. Ogi, "An SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection", NDT & E International, Volume 32, Issue 3, pp.127-132 (1999)

## I

- [I1] 伊賀幹二, 小西孝, “診察から診断に至るために必要な一般的検査の選択とその思考過程”, 救急医学, Vol.19, pp.504-507 (1995)
- [I2] 日本鉄鋼協会, “鉄鋼便覧”

## J

- [J1] Japan Nuclear Energy Safety Organization, “Maintenance Management and New Inspection Program” (2010)
- [J2] Joseph L. Rose, Michael J. Avioli, Peter Mudge and Ruth Sanderson, “Guided wave inspection potential of defects in rail”, NDT & E International, Volume 37, Issue 2, pp.153-161 (2004)
- [J3] W. Johnson, S. Norton, F. Bendec and R. Pless, “Ultrasonic Spectroscopy of Metallic Spheres Using Electromagnetic-Acoustic Transduction”, I Acoust. Soc. Am., 91, pp.2637-2642 (1992)
- [J4] W. Johnson, B. A. Auld and G. A. Alers, “Application of Resonant Modes of Cylinders to Case Depth Measurement”, in Rev, of Progress in QNDE, Vol.13, pp.1603-1610 (1994)
- [J5] (財) 発電設備技術検査協会(JAPEIC), “平成 12 年度 高度軽水炉安全管理技術開発(高稼働率技術開発等)のうち運転中検査技術に関する事業報告書 (フェーズ I 総括版)” (2000)
- [J6] 日本機械学会, “発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2009 年版) <第 II 編 高速炉規格>”, JSME S NC2-2009 (2009)

## **K**

[K1] T. Koyama, K. Ohe, “Consideration of the structure of process tasks in hypothesizing process at first clinical encounters”, Research bulletin of the National Center for Science Information System5, pp.41-51 (1992)

[K2] K. Kawashima, “Nondestructive Characterization of Texture and Plastic Strain Ratio of Metal Sheets with Electromagnetic Acoustic Transducers”, I Acoust. Soc. Am., 87, pp.681-690 (1990)

[K3] K. Kawashima and O. B. Wright, “Resonant Electromagnetic Excitation and Detection of Ultrasonic Waves in Thin Sheets”, I Appl. Phys., 72, pp.4830-4839 (1992)

[K4] K. Kawashima, “Experiments with Two Types of Electromagnetic Ultrasonic Transducers”, I Acoust. Soc. Am., 60, pp.365-373 (1976)

## **L**

[L1] Y. Ling, K. Maki, N. Yusa and K. Miya, “Development of the Optimization Model for TBM Time Intervals in Maintenance Methods Combined TBM and CBM”, Transactions of the Atomic Energy Society of Japan, Vol. 6, No. 3, pp.312-319 (2007)

## **M**

[M1] B M Mahathir., K. Yamada, Y. Higuchi, “Clinical reasoning system based on clinicians diagnostic process”, Biomedical fuzzy systems association, Vol.10, No.1, pp.1-10 (2008)

[M2] B. W. Maxfield and C. M. Fortunko, “The Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers (EMATs)”, Mater. Eval., 41, pp.1399-1408 (1983)



- [M3] B. W. Maxfield and C. M. Fortunko, “The Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers (EMATs)”, Mater. Eval., 41, pp.1399-1408 (1983)
- [M4] K. Mirkhani, “Optimal design of EMAT transmitters”, NDT&E International 37 pp.181-193 (2004)
- [M5] B.W.Maxfield, A.Kuramoto and J.K.Hulbert, “Evaluating EMAT Designs for Selected Applications”, Materials Evaluation, Vol.45, pp.1166-1184 (1987)
- [M6] R. Murayama,” Driving mechanism on magnetostrictive type electromagnetic acoustic transducer for symmetrical vertical-mode Lamb wave and for shear horizontal-mode plate wave”, Ultrasonics, Volume 34, Issue 7, pp.729-736 (1996)
- [M7]丸善出版, “超音波便覧” (1999)

## N

- [N1] Z. G. Nikiforenko, N. A. Glukhov and I. I. Averbukh, “Measurement of the Speed of Elastic Waves and Acoustic Anisotropy in Plates”, Soy. I Nondestruct. Test. (translated from Defekt oskopiya) , No.4, pp.427-432 (1971)
- [N2]日本原子力研究開発機構, “平成 18 年度福井県における高経年化調査研究報告書” (2005)
- [N3]日本保全学会, ”原子力発電所 保全の現状と今後の在り方について” (2006)
- [N4]日本非破壊検査協会, “超音波探傷試験Ⅱ” (2000)
- [N5]原子力安全・保安院 (NISA) , “関西電力株式会社美浜発電所 3 号機 二次系配管破損事故について(最終報告書)” (2005)

## O

[O1] K. Osaki, Y. Watanabe, H. Usui, “Development of Diagnostic System for Reactor Water Clean-up Pump”, Proceedings of the International Symposium on Machine Condition Monitoring and Diagnosis, pp.30-35

[O2] 荻博次, 平尾雅彦, 福岡秀和, “電磁超音波共鳴法による炭素鋼結晶粒度の測定”, 日本機械学会論文集 A, 60, pp.258-263

[O3] H. Ogi, M. Hirao, T. Honda and H. Fukuoka, “Absolute Measurement of Ultrasonic Attenuation by Electromagnetic Acoustic Resonance”, in Rev. of Progress in QNDE, Vol.14, pp.1601-1608 (1995)

[O4] H. Ogi, M. Hirao and T. Honda, “Ultrasonic Attenuation and Grain Size Evaluation Using Electromagnetic Acoustic Resonance”, I Acoust. Soc. Am., 98, pp.458-464 (1995)

[O5] H. Ogi, M. Hirao, T. Honda and H. Fukuoka, “Ultrasonic Diffraction from a Transducer with Arbitrary Geometry and Strength Distribution”, I Acoust. Soc. Am., 98, pp.1191-1198 (1995)

[O6] 荻博次, 箕浦潔, 平尾雅彦, “強磁性体内での電磁気力による体積波発生のメカニズム”, 日本機械学会論文集 A, 62, pp.1955-1962 (1996)

[O7] H. Ogi, M. Hirao and K. Minoura, “Generation of Axial Shear Acoustic Resonance by Magnetostrictively Coupled EMAT”, in Rev. of Progress in QNDE, Vol.15, pp.1939-1944 (1996)

[O8] H. Ogi, “Field Dependence of Coupling Efficiency between Electromagnetic Field and Ultrasonic Bulk Waves”, I Appl. Phys., 82, pp.3940-3949 (1997)

- [O9] H. Ogi, M. Hirao and K. Minoura, "Noncontact Measurement of Ultrasonic Attenuation during Rotating Fatigue Test of Steel", *J. Appl. Phys.*, 81, pp.3677-3684 (1997)
- [O10] H. Ogi and M. Hirao, "Electromagnetic Acoustic Spectroscopy in the Bolt Head for Evaluating the Axial Stress, in *Nondestructive Characterization of Materials*", Vol.8, pp.671-676 (1998)
- [O11] H. Ogi, M. Hirao and H. Ohtani, "Line-Focusing of Ultrasonic SV Wave by Electromagnetic Acoustic Transducer", *J. Acoust. Soc. Am.*, 103, pp.2411-2415 (1998)
- [O12] H. Ogi, N. Suzuki and M. Hirao, "Noncontact Ultrasonic Spectroscopy on Deforming Polycrystalline Copper; Dislocation Damping and Acoustoelasticity", *Metall. Mater. Trans., A*, 29, pp.2987-2993 (1998)
- [O13] H. Ogi, M. Hirao and T. Ohtani, "Line-Focusing Electromagnetic Acoustic Transducers for Detection of Slit Defects", *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, UFFC-46, pp.341-346 (1999)
- [O14] H. Ogi, A. Tsujimoto, M. Hirao and H. Ledbetter, "Stress-Dependent Recovery of Point Defects in Deformed Aluminum: An Acoustic-Damping Study", *Acta Mater.*, 47, pp.3745-3751 (1999)
- [O15] H. Ogi, H. Ledbetter, S. Kim and M. Hirao, "Contactless Mode-Selective Resonance Ultrasound Spectroscopy: Electromagnetic Acoustic Resonance", *J. Acoust. Soc. Am.*, 106, pp.660-665 (1999)
- [O16] H. Ogi, K. Takashima, H. Ledbetter, M. L. Dunn, G. Shimoike, M. Hirao and P. Bowen, "Elastic Constants and Internal Friction of an SiC-Fiber- Reinforced Ti-Alloy-Matrix Crossply Composite: Measurement and Theory", *Acta Mater.*, 47, pp.2787-2796 (1999)

- [O17] H. Ogi, T. Hamaguchi and M. Hirao, "Ultrasonic Attenuation Peak in Steel and Aluminum Alloy During Rotating Bending Fatigue", *Metall. Mater. Trans., A*, 31, pp.1121-1128 (2000)
- [O18] H. Ogi, M. Dunn, K. Takashima and H. Ledbetter, "Elastic Properties of a SiCf/Ti unidirectional Composite: Acoustic Resonance Measurements and Micromechanics Predictions", *J Appl. Phys.*, 87, pp.2769-2774 (2000)
- [O19] H. Ogi, M. Hirao and S. Aoki, "Noncontact Monitoring of Surface-Wave Nonlinearity for Predicting the Remaining Life of Fatigued Steels", *J. Appl. Phys.*, 90, pp.438-442 (2001)
- [O20] H. Ogi, H. Ledbetter, K. Takashima, G. Shimoike and M. Hirao, "Elastic Properties of a Crossply SiCf/Ti Composite at Elevated Temperatures", *Metall. Mater. Trans., A*, 32, pp.425-429 (2001)
- [O21] H. Ogi, G. Shimoike, M. Hirao, K. Takashima and Y. Higo, "Anisotropic Elastic-Stiffness Coefficients of an Amorphous Ni-P Film", *J Appl. Phys.*, 91, pp.4857-4862 (2002)
- [O22] H. Ogi, G. Shimoike, K. Takashima and M. Hirao, "Measurement of Elastic-Stiffness Tensor of an Anisotropic Thin Film by Electromagnetic Acoustic Resonance", *Ultrasonics*, 40, pp.333-336 (2002)
- [O23] H. Ogi, Y. Minami and M. Hirao, "Acoustic Study of Dislocation Rearrangement at Later Stages of Fatigue: Noncontact Prediction of Remaining Life", *J Appl. Phys.*, 91, pp.1849-1854 (2002)
- [O24] H. Ogi., E. Goda and M. Hirao, "Increase of Efficiency of Magnetostriction SH-Wave EMAT by Angled Bias Field: Piezomagnetic Theory and Measurement", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42, pp.3020-3024 (2003)

- [O25] H. Ogi, S. Kai, T. Ichitsubo, M. Hirao and K. Takashima, Elastic-Stiffness Coefficients of a Silicon-Carbide Fiber at Elevated Temperatures: Acoustic Spectroscopy and Micromechanics Modeling”, *Phil. Mag., A*, 83, pp.503-512 (2003)
- [O26] H. Ogi, N. Nakamura, K. Sato, M. Hirao and S. Uda, “Elastic, Anelastic, and Piezoelectric Coefficients of Langasite (La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>S iO 14): Resonance Ultrasound Spectroscopy with Laser-Doppler Interferometry”, *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 50, pp.553-560 (2003)
- [O27] T. Ohtani, H. Ogi, Y. Minami and M. Hirao, “Ultrasonic attenuation monitoring of fatigue damage in low carbon steels with electromagnetic acoustic resonance (EMAR)”, *Journal of Alloys and Compounds*, 310, pp.440-444 (2000)
- [O28] 大谷俊博, “電磁超音波共鳴法(EMAR 法)による高温機器部材のクリープ損傷評価”, *Memoirs of Shonan institute of technology*, Vol.42, No.1 (2008)

## **P**

- [P1] G. L. Petersen, B. B. Chick, C. M. Fortunko and M. Hirao, “Resonance Techniques and Apparatus for Elastic-Wave Velocity Determination in Thin Metal Plates”, *Rev. Sci. Instrum.*, 65, pp.192-198 (1994)

## **R**

- [R1] V. I. Rimlyand; A. V. Kazarbin; M. B. Dobromyslov, “Active Ultrasonic Nondestructive Testing of Rotating Parts and Bearings”, *Research in nondestructive evaluation*, vol. 15, part 1, pp.19-30 (2003)
- [R2] R. H. Randall, F. C. Rose and C. Zener, ”Intercrystalline Thermal Currents as a

Source of Internal Friction”, Phys. Rev., 56, pp.343-348 (1939)

[R3] H. Rindo, N. Mitabe, K. Ara, K. Nagai, M. Otaka, “Research and development on In-service inspection system for reactor vessel of FBRs”, 2nd International conference on nuclear engineering (ASME ICONE2) (1993)

## S

[S1] 佐々木一正, 太田敏彦, 佐藤秀樹, 共放鳴, 日向洋一, “光ファイバグレーティング歪みセンサによる構造物変形監視システムの開発”, Technical report of IEICE. OFT, 100(85), pp.7-11 (2000)

[S2] 首藤幸司, 西尾信彦, “センサフュージョンを利用した個人行動の未来予測機構(コンテキスト)”, 情報処理学会研究報告. UBI, [ユビキタスコンピューティングシステム] 2006(116), pp.79-84 (2006)

[S3] 信越化学(株)WEB サイト, “<http://www.shinetsumagnetics.com/samarium.htm>”

## T

[T1] R. B. Thompson, G. A. Alers and M. A. Tennison, “Application of Direct Electromagnetic Lamb Wave Generation to Gas Pipeline Inspection”, in IEEE Ultrasonic Symp. Proc., pp.91-93 (1972)

[T2] R. B. Thompson, “A model for the Electromagnetic generation and detection of Rayleigh and Lamb waves”, IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, SU-20, pp.340-346 (1973)

- [T3] R. B. Thompson, "Mechanism of Electromagnetic Acoustic Generation and Detection of Ultrasonic Lamb Waves in Iron-Nickel Alloy Polycrystals", *I Appl. Phys.*, 48, pp.4942-4950 (1977)
- [T4] R. B. Thompson, "A Model for the Electromagnetic Generation of Ultrasonic Guided Waves in Ferromagnetic Metal Polycrystals", *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-25, pp.7-15 (1978)
- [T5] R. B. Thompson, "Generation of Horizontally Polarized Shear-Waves in Ferromagnetic Materials Using Magnetostrictively Coupled Meander-Coil Electromagnetic Transducers", *Appl. Phys. Letters*, 34, pp.175-177 (1979)
- [T6] R. B. Thompson, S. S. Lee and J. F. Smith, "Microstructure Independent Acoustoelastic Measurement of Stress", *Appl. Phys. Letters*, 44, pp.296-298 (1984)
- [T7] R. B. Thompson, "Physical Principles of Measurements with EMAT Transducers", in *Physical Acoustics*, Vol. 19 (Academic Press, New York), pp.157-200 (1990)
- [T8] R. B. Thompson, "Experiences in the Use of Guided Ultrasonic Waves to Scan Structures", in *Rev. of Progress in QNDE*, Vol. 16, pp.121-128 (1997)
- [T9] The Nuclear and Industrial Safety Agency, "Interim Summary on Secondary Piping Rupture Accident at Mihama Power Station, Unit 3 of the Kansai Electric Power Co., Inc." (2004)
- [T10\*] A. Tagawa, K. Fujiki, T. Yamashita, "Investigation of the on-line monitoring for a pipe wall thinning with high accuracy", *E-Journal of advanced maintenance* vol.1, pp.52-62 (2009)
- [T11] A. Tagawa, M. Ueda, T. Yamashita "Development of the ISI Device for Fast Breeder Reactor MONJU Reactor Vessel", *Journal of Power and Energy Systems* Vol.1 No.1 Special Issue on 14th International Conference on Nuclear Engineering I, pp.3-12 (2007)

- [T12] 田川明広, 藤木一成, “減肉モニタリング用 EMAT の高温耐久試験結果”, 日本保全学会第 6 回学術講演会, pp.570-574 (2009)
- [T13] F. Tatar, J.R. Mollinger, P. Turmezei, A. Bossche, ”Cross-Correlation method applied to an ultrasound system for measuring position and orientation of laparoscopic surgery tools”, Proceedings, XVII IMEKO World Congress, pp.1506-1509 (2003)
- [T14] 田川明広, 上田雅司, 椎名章, 山下卓哉, “Development of ISI equipment for Fast Breeder Reactor MONJU- (26) 「もんじゅ」用 ISI 装置の開発 (26)1 次主冷却系配管検査装置用タイヤ型超音波探触子の最適化“, 日本原子力学会 秋の大会 予稿集, F24 (2005)
- [T15] K. Takahashi, A. Shiina, T. Onizawa, S. Ibaki, T. Yamaguchi, A. Tagawa, “ Inspection of the steam generator heat transfer tubes for FBR Monju restart“, Proceedings of 17th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-17), pp.717-725 (2009)
- [T16] The Nuclear Safety Commission of Japan , “Final report on the secondary piping rupture accident of Unit 3, Mihama Nuclear Power Station, The Kansai Electric Power Company, Inc.”, NSC 2005-0428 (2005)
- [T17\*] 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ニタリング法の研究” 日本保全学会誌, Vol.9, No.1, pp.45-50 (2010)
- [T18\*] Akihiro TAGAWA, Kazunari FUJIKI and Fumio KOJIMA, “Investigation of an on-line pipe wall defect monitoring sensor”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 33, pp.639-647 (2010)



## W

[W1] R. L. Wegel and H. Walther “Internal Dissipation in Solids for small cyclic strains”, Physics, 6, pp.141-157 (1935)

## X

[X1] Y. Xu, A. Tagawa, M. Ueda and T. Yamashita, Y. Ohtsuka, K. Osafune and M. Nishikawa, “Characterization of SH Wave Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) at Elevated Temperature, in Recent Advances in Nondestructive Evaluation Techniques for Material Science and Industries”, 2004 ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP-Vol.484, pp.177-184 (2004)

[X2] Y. Xu., A. Tagawa, K. Fujiki, M. Ueda, T. Yamashita, “Development of a SH wave single unit electromagnetic acoustic transducer (EMAT) for MONJU Reactor Vessel In-service inspection”, Proceeding of 17th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE), 2009, Proceeding of ICONE17—75027 , pp.1-10 (2009)

[X3] Y. Xu, A. Tagawa, M. Ueda, T. Yamashita, Y. Ohtsuka, K. Osafune and M. Nishikawa, “Characterization of SH wave electromagnetic acoustic transducer(EMAT) at elevated temperature” Proceedings of PVP 2004, 2004 ASME/JSME Pressure Vessels and piping conference (2004)