



ISSN 1349-1121  
JAXA-RM-05-006

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### 黒鉛素材のフェイズドアレイ型超音波自動探傷検査方法

佐藤 英一，志波 光晴，山下 清貴  
佐藤 明良，掄 美津男，北見 薫

2006年 3 月

宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency

# 目 次

概 要 .....	1
序 論 .....	2
黒鉛素材のフェイズドアレイ型超音波自動探傷検査方法	
1. 適用範囲 .....	4
2. 引用規格 .....	4
3. 定 義 .....	4
4. 検査の原理 .....	4
5. 試験体及び検出対象きず .....	4
6. 技術者 .....	4
7. フェイズドアレイ型超音波自動探傷システムの構成 .....	4
7.1 フェイズドアレイ型超音波自動探傷システムの基本構成 .....	4
7.2 フェイズドアレイ型超音波探傷器 .....	4
7.3 配列形探触子 .....	5
7.4 機械式走査装置 .....	5
8. 試験片 .....	5
8.1 標準試験片 .....	5
8.2 対比試験片 .....	5
9. 超音波探傷試験の条件設定 .....	5
9.1 探傷試験に必要な走査範囲及び監視範囲 .....	5
9.2 探傷深さごとの送受信素子数及び焦点 .....	5
9.3 距離振幅補償及び基準感度 .....	6
9.4 感度補正 .....	6
10. 超音波自動探傷検査 .....	6
10.1 超音波自動探傷検査の手順 .....	6
10.2 試験体 .....	6
10.3 試験準備 .....	6
10.4 超音波伝搬特性試験 .....	7
10.5 超音波探傷試験 .....	7
11. 合否判定基準 .....	7
12. 記 録 .....	8
12.1 試験実施成績書 .....	8
12.2 探傷条件 .....	8
12.3 探傷データ .....	8
附属書1（規定）黒鉛素材の超音波探傷検査用試験片及び測定法 .....	10
附属書2（規定）黒鉛素材の超音波伝搬特性試験方法 .....	15

黒鉛素材のフェーズドアレイ型超音波自動探傷検査方法 資料	16
1. 探傷範囲設定の根拠及び全方位探傷の確認	16
1.1 目的	16
1.2 シミュレーション方法	16
1.3 反射指向性の検討	16
1.4 シミュレーション結果による探傷条件の設定	17
2. 距離振幅補償曲線の設定例	17
3. 探傷感度補正量の測定例	20
3.1 試験体の音速測定	20
3.2 試験体の探傷感度測定	20
3.3 対比試験片の探傷感度測定	20
3.4 探傷感度補正量	20
4. 探傷感度の設定例	20
4.1 探傷感度の設定例の概要	20
4.2 X-Y走査ピッチにおける感度補正量の測定例	21
4.3 セクター走査ピッチにおける感度補正量の測定例	21
4.4 探触子旋回走査ピッチにおける感度補正量の測定例	21
4.5 コーナ入射における感度補正量の測定例	22
5. 一探触子による自動探傷とフェーズドアレイ型自動探傷の欠陥検出性の検証例	24
5.1 目的	24
5.2 探傷方法	24
5.3 探傷結果	24
6. 水浸用アレイプローブ装置（特許出願書類）	26

# 黒鉛素材のフェイズドアレイ型超音波自動探傷検査方法

佐藤英一\*<sup>1</sup>, 志波光晴\*<sup>2</sup>, 山下清貴\*<sup>3</sup>, 佐藤明良\*<sup>3</sup>, 袴美津男\*<sup>4</sup>, 北見 薫\*<sup>4</sup>

Method of Automatic Ultrasonic Inspection by Phased Array System for Graphite Ingot

By

Eiichi SATO\*<sup>1</sup>, Mituharu SHIWA\*<sup>2</sup>, Kiyotaka YAMASHITA\*<sup>3</sup>, Akiyoshi SATO\*<sup>3</sup>,  
Mitsuo KOSHIRAE\*<sup>4</sup> and Kaoru KITAMI\*<sup>4</sup>

## Abstract

In February 2000, the Institute of Space and Astronautical Science launched M-V-4 rocket that showed an unexpected failure. Space Activities Commission, Japan strongly demanded improving a quality assurance of a nozzle throat insert of a solid rocket motor made of isotropic graphite. After intensive research and development, JIS Z 2356 "Method of automatic ultrasonic inspection for graphite ingot" was enacted. However since it requires a large amount of inspection time, this standard has been developed utilizing a phased array system for reducing inspection time and improving inspection reliability. This standard applies to inspection of an isotropic graphite ingot for a nozzle throat of a solid rocket motor for the detection of plane flaws in various directions, through pulse echo, immersion testing using a phased array ultrasonic inspection system.

**Keywords:** solid rocket motor, isotropic graphite, nondestructive inspection, ultrasonic testing, phased array

## 概 要

宇宙科学研究所のM-Vロケット4号機の打上げ失敗（2000年2月10日）の対策として、宇宙開発委員会 技術評価部会によって、固体ロケットモータのノズルに使用されている等方性黒鉛製のスロートインサートと呼ばれる耐熱部材の品質保証が強く要請された。そこで、宇宙研を中心として研究開発を実施した結果、JIS Z 2356「黒鉛素材の超音波自動探傷検査方法」が制定された。しかしながら、この検査方法は多大な時間を必要とするため、フェーズドアレイ型超音波探傷システムを用いて検査時間の短縮と信頼性の向上を図った探傷方法が開発された。この規格は、開発された宇宙用固体ロケットモータのノズルスロート材に用いる等方性黒鉛材料について、材料内部に存在するあらゆる方位を向いた面状きずを、フェーズドアレイ型超音波探傷システムを用いた水中でのパルス反射法により探傷検査する方法について規定している。

- 
- \* 1 (独)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)
  - \* 2 (財)発電設備技術検査協会 溶接・非破壊検査技術センター (NDE Center, Japan Power Engineering and Inspection Corporation)
  - \* 3 (株)IHIエアロスペース (IHI Aerospace Co. Ltd.)
  - \* 4 日立エンジニアリング(株) (Hitachi Engineering Co., Ltd.)

## 序 論

宇宙科学研究所（宇宙研：現 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所本部）のM-Vロケットは、全段固体ロケットモータの3段式ロケットで、高度250kmの地球低軌道に約1.8トンの衛星を投入することができる。固体ロケットモータは、モータ本体がそのまま燃焼室になっており、燃料・酸化剤はあらかじめ練り合わされて固められ、燃焼室に充填されている。高温高压の燃焼ガスは、ノズルを通して超音速で吹き出し、推力を生じる。ノズルの一番くびれた部分がスロートと呼ばれている。このノズルスロートは、過酷な環境で使用される固体ロケットモータの中核部品であり、燃焼ガスに対する高い耐熱性、耐熱衝撃性および耐浸食（エロージョン）性が要求される。黒鉛（グラファイト）は、3000℃を超えても固体状態を保ち強度低下が少なく、耐熱衝撃性、耐浸食性に加え、加工性に優れることから、ノズルスロート材料として広く用いられてきた。我が国においても、固体ロケット開発初期から使用してきて多数の実績があり、製造現場において十分な信頼性が確保されていると判断されていた。

しかしながらM-Vロケット4号機は、第1段モータの黒鉛製ノズルスロートインサートが破損脱落したために、衛星を軌道に投入することができなかった<sup>[1]</sup>。不具合調査において、ノズルスロートインサートへの負荷（熱入力）の再評価と破壊統計論による強度解析を行った結果、不具合の最初の事象が確認された時刻までに健全な黒鉛製ノズルスロートインサートが破壊する可能性はきわめて小さく、黒鉛固有の内部欠陥あるいは組み立て加工時に生じた表面欠陥が破損の原因であると考えられた。そして、宇宙開発委員会技術評価部会により、固体ロケットモータのノズルに使用されている等方性黒鉛製スロートインサートの品質保証が強く要請された<sup>[2]</sup>。

黒鉛材料は、我が国の固体ロケットモータのノズル部材に多数使用されてきており実績が多いこと、非破壊検査が難しい材料であることから、精密な非破壊検査はこれまで省略されてきた。宇宙分野以外でも、大型の黒鉛部材に対する非破壊検査は、日本原子力研究所高温工学試験研究炉（HTTR）炉心支持黒鉛構造物<sup>[3,4]</sup>を除いては、ほとんど実施されていない。そこで、宇宙研が中心となり産学協同で、黒鉛素材の非破壊検査の研究開発が行われた。負荷評価の結果、検出対象きずが面状きずであり、厚肉部材中であらゆる方位を対象としなければならないことが明らかになったので、一探触子を使ったパルス反射法を利用して、水中で行う超音波自動探傷検査方法が開発された<sup>[5,6]</sup>。この検査方法は、宇宙科学研究所報告<sup>[7]</sup>として公開された後に、日本非破壊検査協会規格NDIS

2425<sup>[8]</sup>及び日本工業規格JIS Z 2356<sup>[9]</sup>として、順次制定された。この探傷検査方法は、M-Vロケット5号機（2003年5月打ち上げ）及びS-310観測ロケット30～34号機（2002年2月～2004年8月打ち上げ）の品質保証に適用され、これらの成功をもたらした。

しかしながら、この探傷検査方法の実施には検査作業と解析作業に多大な時間がかかっており、探傷検査時間の大幅な短縮が強く望まれるところであった。また、M-Vロケット補助モータ及びS-310観測ロケット主モータに加え、S-520観測ロケット主モータの品質保証にも適用するには、探傷可能試験体の大型化も必要であった。さらに、検査作業のより一層の自動化と探傷結果の解析機能の向上も望まれていた。これには、配列形探触子からの超音波ビームを電子走査するフェーズドアレイ法が有効であると考え、黒鉛探傷に適したフェーズドアレイ型超音波探傷システムの開発を行ってきた<sup>[10]</sup>。

ここで開発した黒鉛探傷における課題は、主に以下の4項目である。

- (1) きずの方向と位置が特定できないことから、フェーズドアレイによるセクタ走査と機械的走査による探触子の回転及び平面走査を組み合わせた全方位欠陥検出が可能な探傷走査方式を開発し、その走査方法が全方位欠陥検出していることをシミュレーションにより確認した。
- (2) 黒鉛が高減衰材料（0.1dB/mm以上）であることから、以下のような電子走査による超音波ビームの最適化を行った。
  - 1) 低周波探傷：1MHzのプロープの開発
  - 2) 探傷深さによる振動子開口量の最適化：ダイナミックアパーチャ機能の採用
  - 3) 探傷深さによる超音波ビームのフォーカス：ダイナミックフォーカス機能の採用
  - 4) 距離振幅補償（DAC）：探傷角度毎のDACの採用
- (3) 探傷に手間と時間がかかることから、試験体一面の探傷中は完全自動運転できるようにした。
- (4) 超音波特性が複雑であることから、全波形取込みによる探傷後の波形確認機能ができるようにした。

開発した探傷検査方法は、S-310観測ロケット35号機（2004年10月打ち上げ）の品質保証において、従来の一探触子による探傷検査方法と併用して実施され、その適用性が確認された。この検査方法は、固体ロケットのためだけの技術ではなく、セラミックスやチタン等の焼結材料の素材検査一般に今後必要とされて来るであろうと考えられる。

本報告は、開発した探傷検査方法を「黒鉛素材のフェ

イズドアレイ型超音波自動探傷検査方法」として規格の形で公表するものである。次ページ以降がJIS規格に準拠した規格本文である（附属書2篇付き）。その後、この探傷検査方法の開発にあたり行ってきた解析や実験等の結果、及び出願中の特許<sup>[11]</sup>を資料としてまとめた。

このなかで、Type I 試験体（265mm×265mm×265mm）は、S-310ロケット主モータのスロートインサート用素材及びM-Vロケット補助モータのスロート用素材として使用しているものである。また、Type II 試験体（320mm×320mm×320mm）は、S-520ロケット主モータのスロートインサート用素材として使用予定のものである。なお、開発したフェーズドアレイ型超音波探傷装置外観及びシステム構成（日立エンジニアリング㈱製KG-U31）を図1に示す。

#### 参考文献

- [1] 佐藤英一，小野田淳次郎：グラファイトの多軸破壊則および非破壊検査—M-Vロケット4号機の打ち上げ失敗から—，まてりあ，40（2001），723-730.
- [2] 宇宙開発委員会技術評価部会，M-Vロケット4号機打ち上げ失敗の原因究明および今後の対策について（報告），（2000）.
- [3] 大岡紀一，伊与久達夫，石井敏満，多喜川昇，塩沢周策，神戸護，三木俊也，緒方隆昌，河江秀俊：HTTRの黒鉛受け入れ検査における超音波探傷試験，JAERI-M 93-003，日本原子力研究所，（1993）.
- [4] T. Iyoku, S. Shiozawa, N. Ooka, M. Kambe and A. Ide : Ultrasonic and Eddy Current Testing of Nuclear Graphite, Trans. of the 11th Int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology, (1991) 377-382.
- [5] 井田隆志：黒鉛素材の超音波自動探傷検査方法について，非破壊検査，53（2004）395-399.
- [6] 佐藤英一，志波光晴，品川議夫，井田隆志，山添智，佐藤明良，：黒鉛材料の面状きずを対象とした超音波探傷法の検討，非破壊検査，55（2006）印刷中.
- [7] 佐藤英一，三原 毅，志波光晴，佐藤明良，山添智，島田義嗣，品川議夫，井田隆志：グラファイト素材の水浸型超音波自動探傷法による全方位欠陥の体積検査方法：宇宙科学研究所報告，vol.126（2003）.
- [8] NDIS2425：黒鉛素材の超音波自動探傷検査方法，日本非破壊検査協会，（2004）.
- [9] JIS Z 2356：黒鉛素材の超音波自動探傷検査方法，日本工業標準調査会，（2006）.
- [10] 拵美津男，北見薫：黒鉛素材の全方位探傷用電子走査式アレイ型超音波探傷システムの開発，非破壊検査，53（2004），405-409.
- [11] 拵美津男，北見薫，佐藤英一，佐藤明良，山下清隆：水浸用アレイプローブ装置，特願2006-75928，（2006）特許出願中.

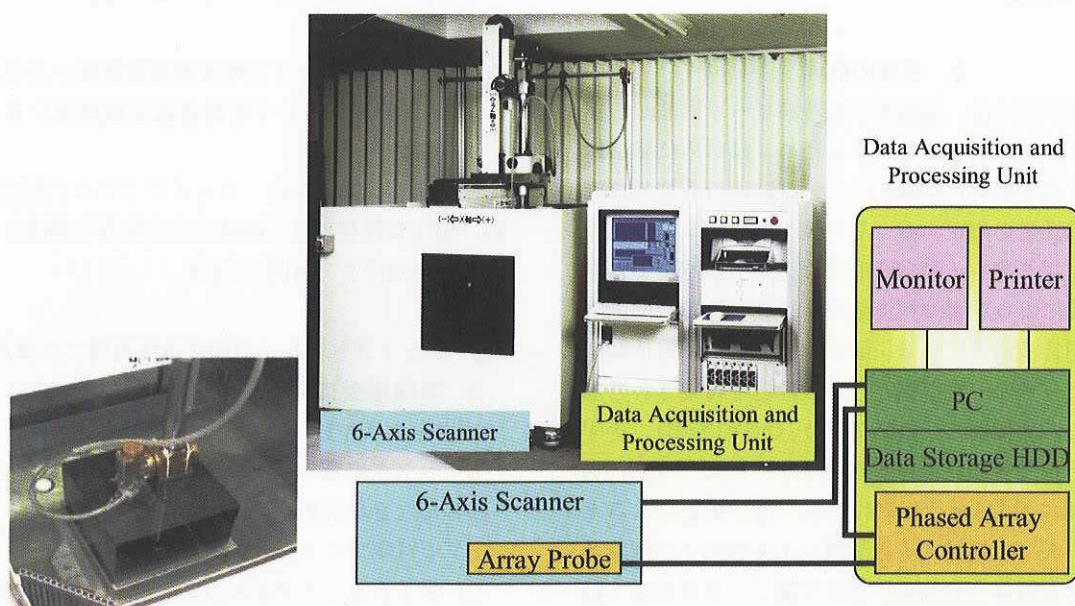


図1 フェーズドアレイ型超音波探傷システムの外観及び構成

# 黒鉛素材のフェイズドアレイ型超音波自動探傷検査方法

## Method of Automatic Ultrasonic Inspection by Phased Array System for Graphite Ingot

### 1. 適用範囲

この規格は、宇宙用固体ロケットモータのノズルスロート部材に用いる等方性黒鉛材料について、材料内部に存在するあらゆる方位を向いた面状きずを、フェーズドアレイ型超音波探傷システムを用いた水中でのパルス反射法により検査する方法について規定する。

### 2. 引用規格

次に掲げる規格は、この規格に引用されることによって、この規格の規定の一部を構成する。これらの引用規格は、その最新版（追補を含む。）を適用する。

- JIS Z 2300 非破壊試験用語
- JIS Z 2305 非破壊検査一技術者の資格及び認証
- JIS Z 2351 超音波探傷器の電気的性能測定方法
- JIS Z 2352 超音波探傷装置の性能測定方法
- JIS Z 2356 黒鉛素材の超音波自動探傷検査方法

### 3. 定義

この規格で用いる主な用語の定義は、JIS Z 2300及びJIS Z 2356の3.（定義）によるほか、次による。

- a) ダイナミックフォーカス 配列形探触子のセクタ走査時に、任意の焦点距離を設定できる機能。
- b) ダイナミックアパーチャ 配列形探触子のセクタ走査時に、任意の開口量（送受信素子数）を設定できる機能。

### 4. 検査の原理

この検査方法では、伝搬する超音波ビームに波頭の揺らぎが見られる素材を対象とするため、はじめに試験体ごとに超音波伝搬特性試験を行い、試験体の音速及び探傷感度の補正量を測定する。その後、試験体全体を水没させフェーズドアレイ型超音波探傷システムを用いたパルス反射法により超音波探傷試験を行う。探傷時間削減のため、超音波探傷試験は、試験体全体に対する比較的荒い探傷ピッチの一次探傷と、一次探傷で特定された部位に対する二次探傷の二段階で行う（付図1参照）。きずの方位が特定できない素材を対象とするため、立方体形状の試験体に対し6面それぞれから、電子走査によるセクタ走査、並びに機械式走査装置による探触子の回転及び平面走査を組み合わせた探傷を実施し、あらゆる方位の面状きずを効率よく検出する。

### 5. 試験体及び検出対象きず

この規格で検査する試験体は、265mm×265mm×265mm（Type I）あるいは320mm×320mm×320mm（Type II）の立方体、検査領域は、その中央部の直径215mm×高さ210mm（Type I）あるいは直径270mm×高さ160mm（Type II）の円柱とする。試験体及び検査領域の形状・寸法を付図2に示す。検出対象きずは、等価直径3 mm以上の面状きずとする。

- 備考1. ここでいう等方性黒鉛とは、静水圧成形を使用して製造されたものをいう。
- 2. 試験体は、検査する試験体より高さが25mm大きい、265mm×265mm×290mm（Type I）あるいは320mm×320mm×345mm（Type II）の直方体を準備する。超音波伝搬特性試験後に高さ25mmの部分切削削除する。
- 3. 探傷検査の前提として、設計において許容欠陥の寸法、位置、方向を評価しておくことが要求される。

### 6. 技術者

この探傷検査に従事する技術者は、JIS Z 2305のUTレベル2の有資格者又は相当の技術者とし、黒鉛材料に関する知識、及びその探傷についての十分な知識をもち、かつフェイズドアレイ型超音波探傷システムの使用に関する教育及び訓練を受けたものとする。

### 7. フェイズドアレイ型超音波自動探傷システムの構成

#### 7.1 フェイズドアレイ型超音波自動探傷システムの基本構成

使用するシステムは、フェイズドアレイ型超音波探傷器、配列形探触子及び機械式走査装置で構成される。システムの構成を、付図3に示す。

#### 7.2 フェイズドアレイ型超音波探傷器に必要な機能

- a) 同時送受信素子数 同時に送受信できる素子数（チャンネル数）は、最大48素子とする。
- b) セクタ走査 セクタ走査は、水中より黒鉛に入射したときの屈折角が $-10^{\circ}$ ～ $+60^{\circ}$ の範囲で、 $1^{\circ}$ ステップで可変できなければならない。
- c) ダイナミックフォーカス ビーム路程内に5点以上の焦点を設定できるものとする。
- d) ダイナミックアパーチャ 設定した焦点ごとに開

口量（送受信素子数）を設定できるものとする。

e) エコー収録ゲート 最低1つのエコー収録ゲートを持つものとする。

f) 距離振幅補償 入射角それぞれにおいて、ビーム路程内の4点以上のエコー高さより距離振幅補償曲線を作成でき、かつ距離振幅補償回路は30dB以上補償できなければならない。

g) 画面表示 試験体の各探傷面（入射面）に対して以下の表示ができること。

1) A, B, Cスコープ表示が同時に表示でき、エコー高さ又は領域の下限は測定後においても任意の高さに変更して表示できること。

2) Cスコープ表示の各座標軸は3mm以下の分解能で反射源の位置を表示でき、収録したエコー高さ又は領域別に2種類以上の濃淡又は色合いで確認できること。

3) 各入射条件におけるエコー収録ゲート内の最大エコーのエコー高さ及びビーム路程、並びに探触子入射点位置、屈折角及び入射面内旋回角の数値データを表示できること。

4) 探傷結果の画面は、欠陥の三次元表示ができかつ欠陥の3方向への投影図としてあらわすことができることとする。

h) 記録 試験体の各探傷面（入射面）に対して、以下の記録ができること。

1) A, B, Cスコープ画像

2) エコー収録ゲート内の最大エコーのエコー高さ及びビーム路程、並びに入射点位置、屈折角及び入射面内旋回角の数値データ

#### 7.2.2 フェイズドアレイ型超音波探傷器に必要な性能

a) 増幅直線性 増幅直線性は、送受信素子数48の条件（遅延時間 $0\mu\text{s}$ ）で、JIS Z 2352の4.1（増幅直線性）により測定し、 $\pm 3\%$ の範囲に入っているものとする。

b) 送受信遅延時間 送受信遅延時間は、最大 $20\mu\text{s}$ まで、 $10\text{ns}$ 単位で設定可能とする。

c) 送信電圧 送信電圧は、JIS Z 2351の4.1.5（送信パルスの振幅）により測定し、波高値が $100\sim 300\text{V}$ のスクエアウェーブパルスとする。

d) 受信周波数帯域 受信周波数帯域は、JIS Z 2351の4.2.4（高周波増幅回路）により測定し、 $0.5\sim 2.5\text{MHz}$ とする。

#### 7.3 配列形探触子

##### 7.3.1 配列形探触子に必要な機能

配列形探触子は、公称周波数 $1\text{MHz}$ （狭帯域）、96素子の配列型探触子（リニアアレイプローブ、1素子の長

さ $17\text{mm}$ 、幅 $1\text{mm}$ 、素子のピッチ $1\text{mm}$ ）を用いる。このうち半分の48素子は、試験体表面からの反射波の混入を防止するための反射体（ダミー素子）として使用する。この探触子は、セクタ方向に $20^\circ$ 傾斜して使用する。

##### 7.3.2 配列形探触子に必要な性能

配列形探触子に必要な性能として、各素子の感度を附属書1の3.により確認する。

#### 7.4 機械式走査装置

機械式走査装置は、X, Y, Zの3軸に加え、試験体の回転及び探触子の旋回が可能な駆動機構及び水槽を用いる。

##### 7.4.1 機械式走査装置に必要な機能

機械式走査装置は、以下の事項の制御を行う。

a) X, Y, Z軸 手動による移動及び自動走査（ピッチ及び速度）

b) 探触子旋回軸  $\theta$  手動による移動及び自動走査（ピッチ及び速度）

c) 試験体回転軸R 手動による移動

##### 7.4.2 機械式走査装置に必要な性能

機械式走査装置は、以下の走査範囲及び精度を有するものとする。

a) X, Y, Z軸 分解能及び手動による最小ピッチは $0.5\text{mm}$ 以下、自動走査の最小ピッチは $1\text{mm}$ 以下とする。

b) 探触子旋回軸  $\theta$  及び試験体回転軸R 走査範囲は $0^\circ\sim 360^\circ$ で、分解能及び手動による最小ピッチは $0.5^\circ$ 以下、自動走査の最小ピッチは $1^\circ$ 以下とする。

##### 7.4.3 水槽

水槽には、多重反射による疑似エコー防止のための処置を行うこと。

## 8. 試験片

### 8.1 標準試験片

標準試験片は、附属書1の1.に示すものを用いる。

### 8.2 対比試験片

対比試験片は、附属書1の2.に示すものを用いる。

## 9. 超音波探傷試験の条件設定

### 9.1 探傷試験に必要な走査範囲及び監視範囲

2種の試験体を探傷試験するのに必要な屈折角の走査範囲及びビーム路程の監視範囲（水距離を含まず）は、試験体の立方体6面すべてに対し、表1のように設定する。これにより、検査領域の円柱回転軸は、試験体の3軸のどの方向を向いてもよいことになる。



表1 探傷試験に必要な走査範囲及び監視範囲

試験体	試験体寸法	検査領域	屈折角の走査範囲	ビーム路程の監視範囲
Type I	265mm	$\phi$ 215mm×H210mm	-10°～52°	(25/cos(屈折角)) mm～185mm
Type II	320mm	$\phi$ 270mm×H160mm	-10°～51°	(25/cos(屈折角)) mm～225mm

表2 探傷深さごとの送受信素子数と焦点設定

探傷深さ範囲		10mm以上 50mm未満	50mm以上 80mm未満	80mm以上 120mm未満	120mm以上180mm未満 (Type Iでは185mmまで)	180mm以上 230mm未満
送 受 信 素 子 数	40° > 屈折角	10	16	28	44	48
	48° > 屈折角 ≥ 40°	16	22	44	48	48
	屈折角 ≥ 48°	22	44	48	48	48
焦点の深さ		40mm	60mm	90mm	130mm	250mm
距離振幅補償設定点数		5点	4点	4点	4点	2点
Type I 試験体に必要な探傷領域						
Type II 試験体に必要な探傷領域						

## 9.2 探傷深さごとの送受信素子数及び焦点

2種の試験体における探傷深さ（水距離を含まず）ごとの送受信素子数及び焦点、並びに距離振幅補償設定点数は、表2のように設定する。

## 9.3 距離振幅補償及び基準感度

距離振幅補償曲線及び基準感度 $G_R$ は、附属書1の5.により設定する。

## 9.4 感度補正

- X-Y走査ピッチにおける感度補正量 X-Y走査ピッチにおける感度補正量 $P_{XY}$ は、附属書1の6.により測定する。
- セクタ走査ピッチにおける感度補正量 セクタ走査ピッチにおける感度補正量 $P_{SS}$ は、附属書1の7.により測定する。
- 探触子旋回走査ピッチにおける感度補正量 探触子旋回走査ピッチにおける感度補正量 $P_E$ は、附属書1の8.により測定する。
- コーナ入射における感度補正量 コーナ入射における感度補正量 $\Delta G_C$ は、附属書1の9.により測定する。

## 10. 超音波自動探傷検査

### 10.1 超音波自動探傷検査の手順

超音波自動探傷検査は、超音波伝搬特性試験と超音波探傷試験とに分けられる（付図1）。超音波伝搬特性試験は、試験体の音速測定と探傷感度補正量の測定を行う。超音波探傷試験は、一次探傷と二次探傷に分かれる。

## 10.2 試験体

### 10.2.1 超音波伝搬特性試験における試験体

超音波伝搬特性試験における試験体は、検査する試験体より高さが25mm大きい、265mm×265mm×290mm（Type I）あるいは320mm×320mm×345mm（Type II）の直方体である。附属書2の図2に示す25個の $\phi$  3.0mm平底穴加工を行う。

### 10.2.2 超音波探傷試験における試験体

超音波探傷試験における試験体は、超音波伝搬特性試験の後に、平底穴の加工された高さ25mmの部分を実行して作製された、265mm×265mm×265mm（Type I）あるいは320mm×320mm×320mm（Type II）の立方体である。

### 10.2.3 表面処理

試験体は表面粗さ（中心線平均粗さ） $Ra3.2\mu m$ 以下で機械加工を行った後、十分乾燥させる。防水処理として浸透性の小さなエポキシ樹脂コーティング剤等を表面に薄く塗布するものとする。

## 10.3 試験準備

試験体ごとに下記a)～d)を実施する。

- 配列形探触子素子の感度確認 配列形探触子素子の感度確認は、附属書1の3.により行う。
- 配列形探触子の設置 配列形探触子は試験体に対して、セクタ方向に20°傾けて設置する。水距離は、探触子と入射面の垂直距離が15mmとなるようにするのがよい。試験体内の探傷領域内において距離振

幅曲線に乱れがない条件を、対比試験片を用いて確認する。

c) 機械式走査装置の精度確認 機械走査位置精度の確認方法は、附属書1の4.により行う。

d) 試験体の位置合わせ 試験体コーナの表面エコーを用いて試験体位置の調整を行う。

#### 10.4 超音波伝搬特性試験

超音波伝搬特性試験は、試験体の音速測定と探傷感度補正量の測定を行う。

a) 音速測定 音速測定は、附属書2の2.による。

b) 探傷感度補正量測定 探傷感度補正量 $\Delta G_T$ の測定は、附属書2の3.により行う。

#### 10.5 超音波探傷試験

超音波探傷試験は、一次探傷と二次探傷の2段階からなる。

##### 10.5.1 一次探傷

一次探傷は、以下の条件で行う。

a) 入射面 立方体の6面それぞれを入射面とする。1面ごとに入射面が上になるように試験体を設置し、10.3 d)により試験体の位置合わせを行う。

b) 走査方法、走査範囲及び走査ピッチ 走査方法、走査範囲及び走査ピッチは以下のように設定する。

1) X-Y走査 機械式走査により、270mm×270mm (Type I 試験体) あるいは327mm×327mm (Type II 試験体) の範囲を、3mmピッチで走査する。

2) セクタ走査 電子式走査により、屈折角が $-10^\circ \sim +52^\circ$ の範囲を、Type I 試験体では屈折角が $2^\circ (+20^\circ \sim +40^\circ$ の範囲) あるいは $4^\circ (-8^\circ \sim +20^\circ$ 及び $+40^\circ \sim +52^\circ$ の範囲) のピッチで、Type II 試験体では屈折角が全範囲で $2^\circ$ のピッチで走査する。

3) 探触子旋回走査 機械式走査により、 $0^\circ \sim 360^\circ$ の範囲を、探傷感度 $G$ が12dB程度になるピッチで走査する。

c) 探傷感度 探傷感度 $G$ は、次の式(1)によって設定する。これにより、コーナ入射条件を除き、最小検出対象きず( $\phi$  3mm)のエコー高さが、表示器上50%に設定される。

$$G = G_R + \Delta G_T + P_{XY} + P_{SS} + P_E - 6\text{dB} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $G_R$  : 基準感度

$\Delta G_T$  : 探傷感度補正量

$P_{XY}$  : X-Y走査ピッチにおける感度補正量

$P_{SS}$  : セクタ走査ピッチにおける感度補正量

$P_E$  : 探触子旋回角ピッチにおける感度補正量

d) 二次探傷実施判定基準 最小検出対象きず( $\phi$  3mm)のエコー高さ(表示器上50%)以上のエコーを示す反射源に対しては、9.5.2の二次探傷を実施する。ただし、コーナ入射における感度補正 $\Delta G_C$ が必要な入射条件については、判定基準のエコー高さを感度補正量だけ低下させるものとする。

##### 10.5.2 二次探傷

一次探傷において二次探傷すべき部位が認められた場合には、その部位について二次探傷を実施する。

a) 走査方法 走査方法は、10.5.1のb)と同一である。

b) 走査範囲及び走査ピッチ 走査範囲及び走査ピッチは以下のように設定する。

1) X-Y走査 反射源を中心とした $\pm 8\text{mm} \times \pm 8\text{mm}$ の範囲を、1mmピッチで走査する。

2) セクタ走査 屈折角が $-10^\circ \sim +52^\circ$ の範囲を、屈折角が $1^\circ$ のピッチで走査する。

3) 探触子旋回走査 反射源を中心とした一次探傷の旋回角ピッチを覆う範囲を、 $4^\circ$ ピッチで探傷する。

c) 探傷感度 探傷感度は式(1)を用いて設定する。ここでは、一次探傷とは $P_{XY}$ 、 $P_{SS}$ 、 $P_E$ の値が異なる。

##### 10.5.3 探傷感度の確認

二次探傷終了後に、附属書2の3.6 b)により、対比試験片の探傷感度の測定を行い、10.4 b)で測定した対比試験片の探傷感度と比較する。

a) 探傷感度が3dB未満減少した場合 探傷感度に変化がなかったものとする。

b) 探傷感度が3dB未満増加した場合 エコー高さに探傷感度変化分の補正を加える。

c) 探傷感度が3dB以上変化した場合 附属書1の3.により、配列型探触子素子の感度確認を行う。不合格の場合には、9.3(距離振幅補償及び基準感度)を実施し、10.5.1(一次探傷)に戻って再度探傷検査を実施する。合格の場合には、探傷感度補正量に探傷感度変化分の補正を加え、10.5.2(二次探傷)に戻って探傷検査を実施する。

##### 10.5.4 解析

最小検出対象きず( $\phi$  3mm)のエコー高さ(表示器上50%)以上のエコーを示す反射源が存在する場合には、付図4に示す座標系を用いて反射源位置及び傾き角を算出する。

## 11. 合否判定基準

最小検出対象きず( $\phi$  3mm)のエコー高さ(表示器上50%)以上のエコーを示す反射源が存在する場合には、試験体は不合格とする。ただし、コーナ入射における感度補正が必要な入射条件については、判定基準のエコー

高さを感度補正量 $\Delta G_c$ だけ低下させるものとする。

12. 記 録

12.1 試験実施成績書

試験実施成績書には、次の事項を記載する。

- a) 規格番号
- b) 試験年月日及び実施技術者名
- c) 試験体識別番号、試験体材質及び試験体寸法
- d) 超音波自動探傷器型式番号及び探触子型式番号
- e) 合否判定結果

12.2 探傷条件

探傷条件は、次の事項を記録する。

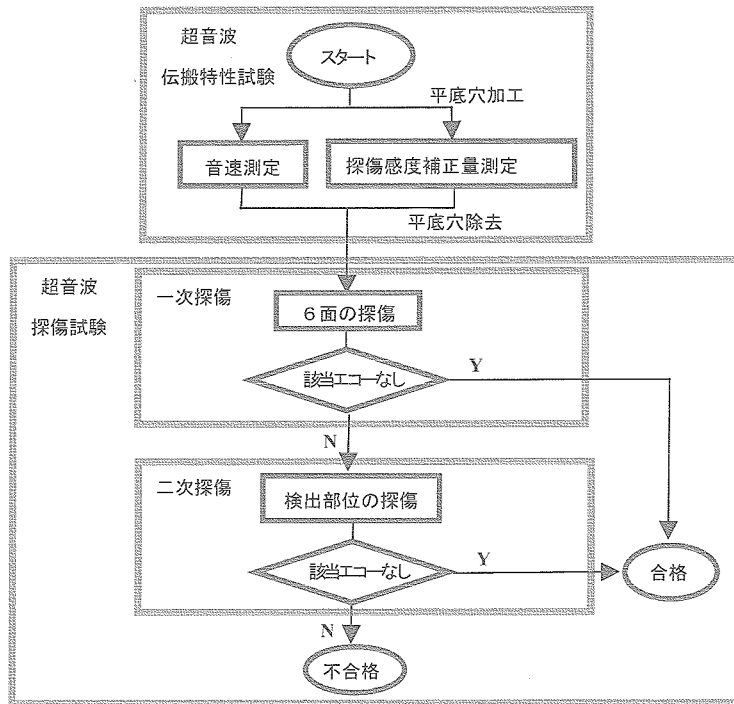
- a) 素子感度
- b) 対比試験片識別番号あるいは形状

- c) 対比試験片のAスコープ及びCスコープ表示
- d) 試験体の最大音速、最低音速及び平均音速
- e) 距離振幅補償曲線
- f) 感度補正量  $\Delta G_T$ ,  $P_{XY}$ ,  $P_{SS}$ ,  $P_E$  及び  $\Delta G_C$

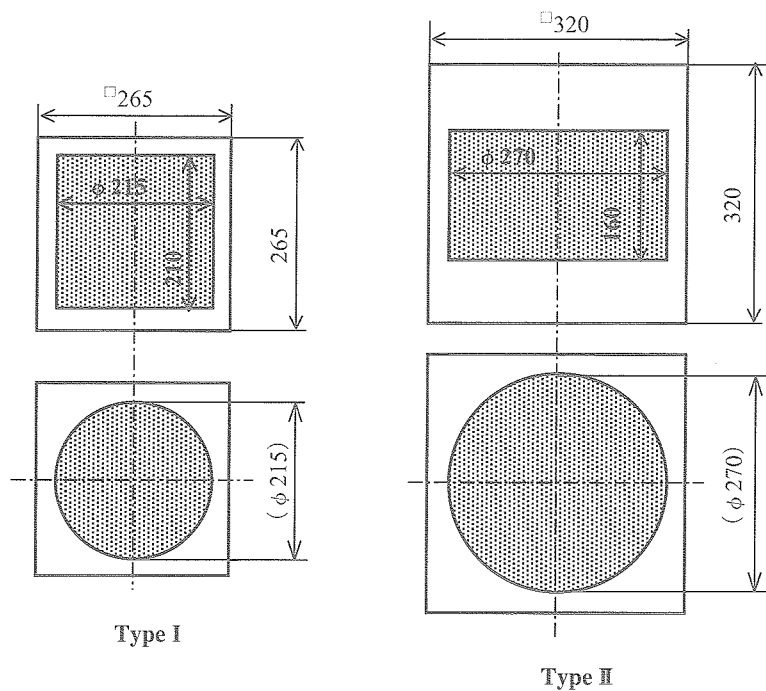
12.3 探傷データ

二次探傷を行った反射源について、以下の内容を記録する。

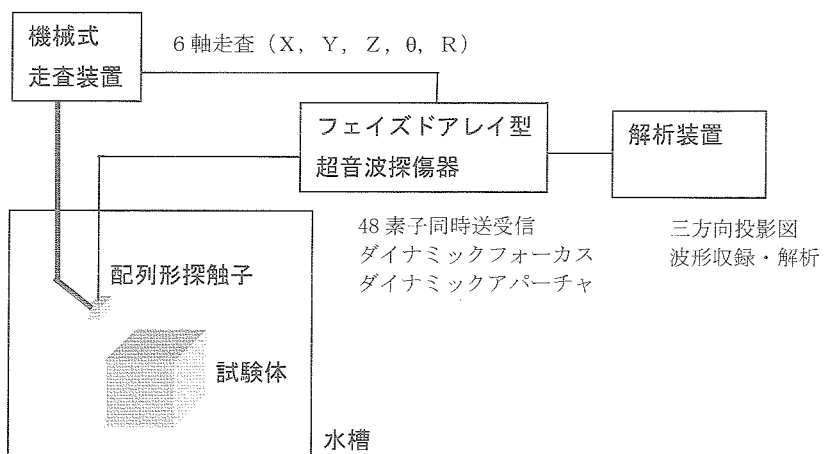
- a) 反射源を検出した超音波ビームの入射面、入射点、屈折角及び探触子旋回角
- b) 反射源の深さ及びエコー高さ
- c) 反射源の位置 X, Y及び Z, 並びに反射源の傾き角度  $\theta_H$  及び  $\theta_V$  (解析に基づく位置)



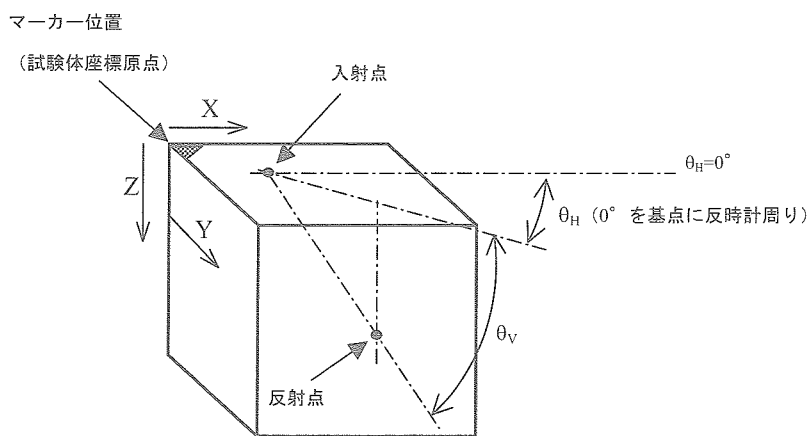
付図1 フェイズドアレイ型超音波自動探傷検査の実施フロー



付図2 試験体及び検査領域



付図3 フェイズドアレイ型超音波自動探傷システムの構成



付図4 反射源位置と傾き角の表示

## 附属書1（規定）黒鉛素材の超音波探傷検査用試験片及び測定法

### 序 文

この附属書は、この規格で使用する標準試験片及び対比試験片、並びにそれらを用いた測定方法について規定する。

#### 1. 標準試験片

- a) **SB-01形試験片** 配列形探触子の各素子の感度を確認するために用いる試験片である。試験片の材質と形状を附属書1付図1に示す。
- b) **SB-02形試験片** 機械式走査装置の精度を確認するために用いる試験片である。試験片の材質と形状を附属書1付図2に示す。
- c) **SB-03形試験片** コーナ入射における感度補正量を測定するために用いる試験片である。試験片の材質と形状を附属書1付図3に示す。

#### 2. 対比試験片

Type I 試験体の探傷ではPh-01～04形対比試験片、Type II 試験体の探傷ではPh-01～05形対比試験片を用いる。試験片の形状を附属書1付図4～8に、試験片の反射

源及び深さを附属書1表1に示す。試験片の材料は、原則試験体と同一ロットのものとする。ただし、試験体と同一ロットの対比試験片を用意することが困難な場合、対比試験片の密度や弾性率、強度などの力学特性が試験体と著しく異ならないことを確認したうえで、別ロットの材料を用いることができる。

#### 3. 配列形探触子素子の感度確認方法

- a) **測定の時期** 配列形探触子の納入時及び探傷試験前、並びに二次探傷後の探傷感度が3dB以上変化した場合に実施する。
- b) **試験片** SB-01形標準試験片を用いる。
- c) **配列形探触子の設置** 配列形探触子と標準試験片入射面を平行にし、水距離を55mmあるいは130mmに設定する。
- d) **測定** 配列形探触子の各素子ごとの表面エコー高さを測定する。
- e) **合否判定** 合否判定基準を附属書1表2に示す。不合格時には再度距離振幅補償の測定を行うこと。

附属書1表1 対比試験片の種類と測定範囲

対比試験片	測定範囲		反射源：φ3mm平底穴	
	深さ (mm)	屈折角 (°)	深さ (mm)	傾き角 (°)
Ph-01	10～50	0～50	10, 20, 30, 40, 50, 60	0
			50	10, 20, 30, 40, 50
Ph-02	70～120		70, 80, 90, 100, 120	0
			120	10, 20, 30, 40, 50
Ph-03	140～180		140, 160, 180	0
			180	10, 20, 30, 40, 50
Ph-04	230～270		230, 270	0
			230	10, 20, 30
Ph-05	325	0	325	0
			230	40, 50

附属書1表2 素子感度変化の許容基準

評価項目	許容基準
最後の距離振幅補償の測定からの同一素子のエコー高さの変化	20%以下

## 4. 機械式走査装置の精度確認方法

- a) 測定の時期 探傷試験前に実施する。
- b) 試験片 SB-02形標準試験片を用いる。
- c) 配列形探触子の設置 10.3 b) と同一とする。
- d) 探傷感度設定 平底穴の最大エコー高さが表示器上100±20%になるように、探傷感度を設定する。
- e) 走査範囲及び走査ピッチ設定
  - 1) X-Y走査範囲及び走査ピッチ 平底穴を中心に±20mmの範囲で、1mmピッチ
  - 2) 探触子旋回角範囲及び旋回角ピッチ 0°～315°の範囲で、45°ピッチ
- f) 測定 各旋回角において、平底穴エコー高さの上位10個のピーク位置座標の平均値を求め、その旋回角での平底穴検出位置座標とする。8つの旋回角における検出位置座標の平均を、平底穴検出位置座標とし、各旋回角における検出位置座標のずれ量を求める。
- g) 合否判定 各旋回角における検出位置座標のずれ量の最大値が3mm以内であること。不合格時には、機械式走査装置を再調整すること。

## 5. 基準感度の設定及び距離振幅補償の方法

- a) 測定の時期 配列形探触子交換後の探傷試験前及び附属書1の3. の不合格時に実施する。
- b) 試験片及び平底穴 Ph-01～03形対比試験体 (Type I 試験体) あるいはPh-01～05形対比試験片 (Type II 試験体) のすべての平底穴を用いる。
- c) 配列形探触子の設置 10.3 b) と同一とする。
- d) 送受信素子数及び焦点 送受信素子数及び焦点設定は、9.2表2による。
- e) 探傷感度設定 各平底穴の最大エコー高さが表示器上100±20%になるように、探傷感度を設定する。
- f) 走査範囲及び走査ピッチ 各平底穴を検出する走査位置を中心に、各平底穴のエコーピークを確認できる範囲について、超音波探傷試験の二次探傷と同一の走査ピッチ (10.5.2 b)) で走査を行う。
- g) 基準感度の設定 距離振幅補償の最大値が27～30dBとなるように設定した感度を、基準感度とする。
- h) 距離振幅補償曲線の設定
  - 1) 距離振幅補償曲線の起点 特に定めない。
  - 2) 設定点 距離振幅補償曲線は、屈折角ごとに設定し、深さ方向の設定点は、探傷深さ範囲ごとに9.2表2のように設定する。距離振幅補償曲線は、屈折角が-10°～52°の範囲で1°おきに設定する。
  - 3) 内外挿方法 対比試験にない探傷深さ及び屈折角における距離振幅補償値は、測定した距離振幅

補償値を内挿あるいは外挿することにより設定する。

## 6. X-Y走査ピッチにおける感度補正量の測定方法

- a) 測定の時期 配列形探触子交換後及び附属書1の3. の不合格時に実施する。
- b) 試験片及び平底穴 Ph-01～03形対比試験体 (Type I 試験体) あるいはPh-01～05形対比試験片 (Type II 試験体) の、深さ325mmの平底穴を除くすべての平底穴を用いる。
- c) 配列形探触子の設置 10.3 b) と同一とする。
- d) 送受信素子数及び焦点 送受信素子数及び焦点設定は、9.2表2による。
- e) 探傷感度設定 各平底穴の最大エコー高さが表示器上100±20%になるように、探傷感度を設定する。
- f) 走査範囲及び走査ピッチ 各平底穴を検出する走査位置を中心に、各平底穴のエコーピークを確認できる範囲について、超音波探傷試験の二次探傷と同一の走査ピッチ (10.5.2 b)) で走査を行う。ただし、X-Y走査ピッチのみ二次探傷における走査ピッチの半分とする。
- g) X-Y走査ピッチにおける感度補正量の測定 各平底穴について、最大エコー高さ、最大エコー高さ位置より探傷試験のX、Y方向の走査ピッチ (10.5.1 c) 1) 及び10.5.2 b) 1)) の半分だけずれた位置におけるエコー高さとの差 (dB) を測定し、X方向のエコー高さの差及びY方向のエコー高さの差の和を求める。すべての平底穴におけるエコー高さの差の和の最大値を、X-Y走査ピッチにおける感度補正量とする。

## 7. セクタ走査ピッチにおける感度補正量の測定方法

- a) 測定の時期、試験片及び平底穴、配列形探触子の設置、送受信素子数及び焦点、探傷感度設定、並びに走査範囲及び走査ピッチ設定 附属書1の6. と同一とする。ただし、ここではセクタ走査ピッチのみ二次探傷における走査ピッチの半分とする。
- b) セクタ走査ピッチにおける感度補正量の測定 すべての平底穴について、最大エコー高さ、最大エコー高さ位置より探傷試験のセクタ走査ピッチ (10.5.1 c) 2) 及び10.5.2 b) 2)) の半分だけずれた屈折角におけるエコー高さとの差 (dB) を測定する。すべての平底穴におけるエコー高さの差の最大値を、セクタ走査ピッチにおける感度補正量とする。

8. 探触子巡回走査ピッチにおける感度補正量の測定方法

- a) 測定の時期、試験片及び平底穴、配列形探触子の設置、送受信素子数及び焦点、探傷感度設定、並びに走査範囲及び走査ピッチ設定 附属書1の6. と同一とする。ただし、ここでは探触子巡回走査ピッチのみ二次探傷における走査ピッチの半分とする。
- b) 探触子巡回走査ピッチにおける感度補正量の測定 すべての傾いた平底穴について、最大エコー高さ、最大エコー高さ位置より探傷試験の探触子巡回走査ピッチ (10.5.1 c) 3) 及び10.5.2 b) 3)) の半分だけずれた回転角におけるエコー高さとの差 (dB) を測定する。すべての傾いた平底穴におけるエコー高さの差の最大値を、探触子巡回走査ピッチにおける感度補正量とする。

9. コーナ入射における感度補正量の測定方法

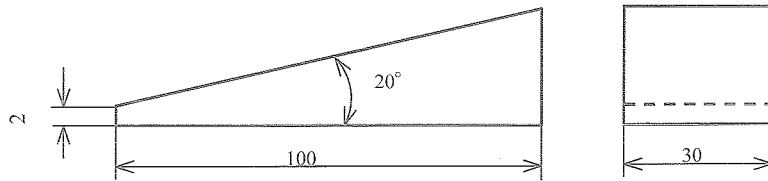
- a) 測定の時期及び配列形探触子の設置 附属書1の6.

と同一とする。

- b) 試験片 SB-03形標準試験片のすべての45°平底穴を用いる。
- c) 送受信素子数及び焦点 焦点深さは100mmとし、9.2表2の送受信素子数すべてを順次実施する。
- d) 探傷感度設定 標準試験片の傾き45°、端面からの距離50mmの平底穴の最大エコー高さが表示器上100±20%になるように感度を設定する。
- e) 走査範囲及び走査ピッチ 各平底穴を検出する走査位置を中心に、各平底穴のエコーピークを確認できる範囲について、超音波探傷試験の二次探傷と同一の走査ピッチ (10.5.2 b)) で走査を行う。
- f) コーナ入射における感度補正量の測定 送受信素子数ごとに、各45°平底穴の最大エコー高さを求める。端面からの距離に対する最大エコー高さの挙動をプロットし、コーナ入射補正を必要とする端面からの距離範囲と補正量 (dB) を定める。

材質： SUS

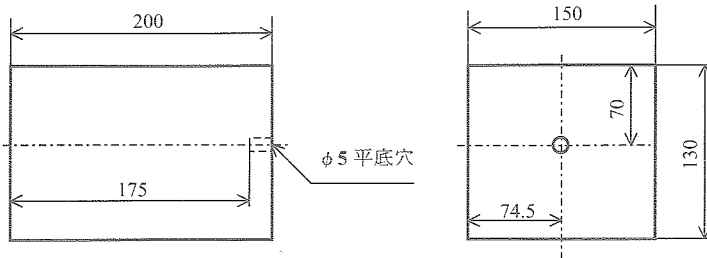
(単位： mm)



附属書1付図1 SB-01型試験片の形状・寸法

材質： ポリスチレン

(単位： mm)

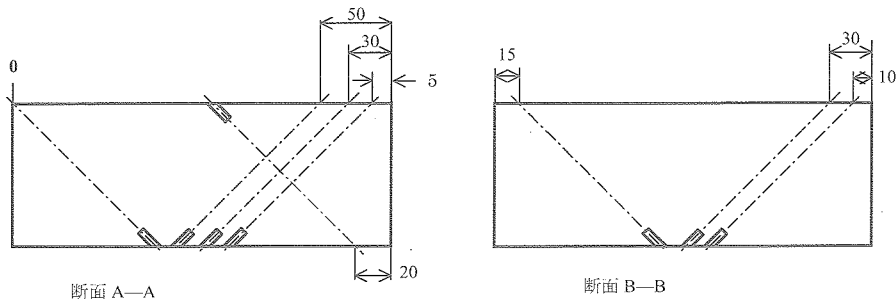


附属書1付図2 SB-02型試験片の形状・寸法

材質： ポリスチレン

平底穴径： φ3 (角度 45°)

(単位： mm)



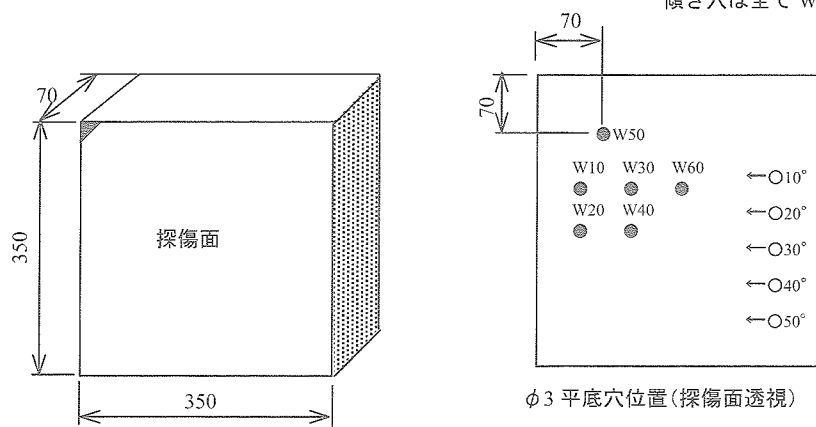
附属書1付図3 SB-03型試験片の形状・寸法

附属書1付図4~8の記号の説明

W	: 探傷面からの垂直深さ
●	: $\phi 3$ 平底垂直穴
○	: $\phi 3$ 平底傾き穴
角度表記	: 傾き角度
矢印	: 傾き穴の方向
▼	: 探傷時の基点

(単位: mm)

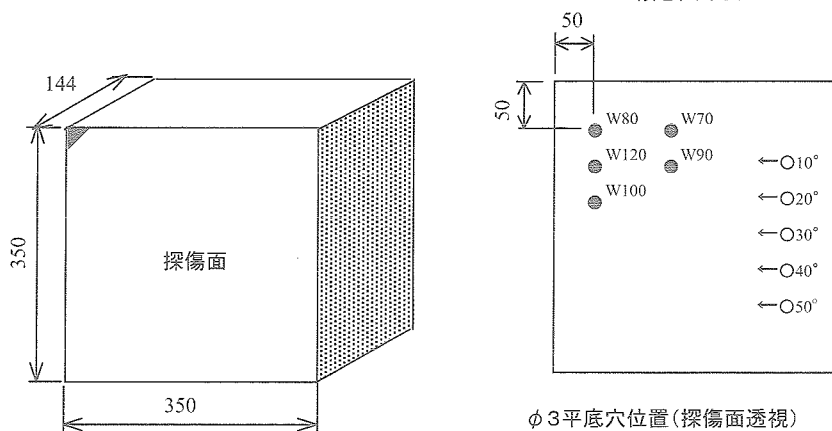
傾き穴は全て W=50



附属書1付図4 Ph-01型試験片の形状・寸法

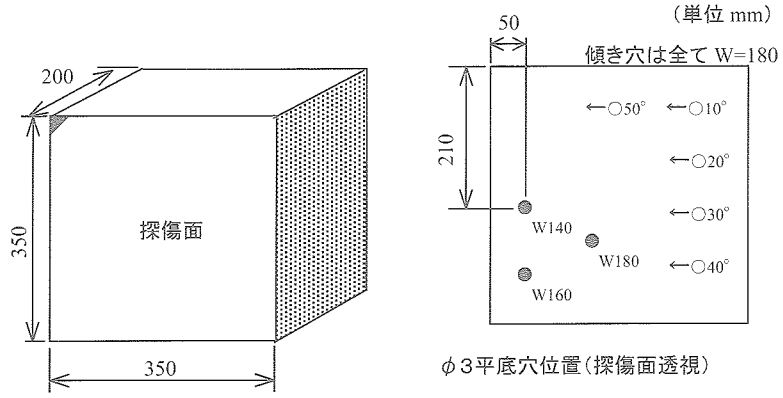
(単位: mm)

傾き穴は全て W=120

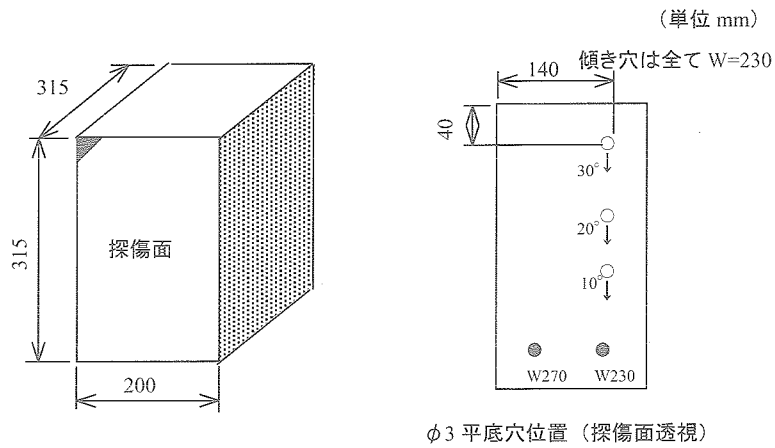


附属書1付図5 Ph-02型試験片の形状・寸法

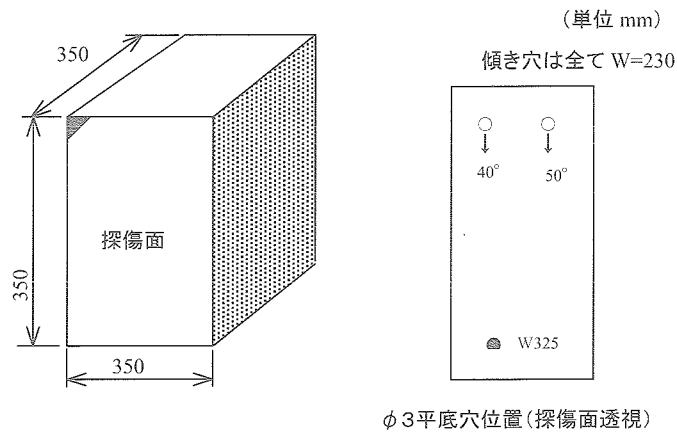




附属書1付図6 Ph-03型試験片の形状・寸法



附属書1付図7 Ph-04型試験片の形状・寸法



附属書1付図8 Ph-05型試験片の形状・寸法

## 附属書2（規定）黒鉛素材の超音波伝搬特性試験方法

### 序 文

この付属書は、この規格で使用する黒鉛素材の超音波伝搬特性試験の方法について規定する。

### 1. 超音波伝搬特性試験の目的と内容

#### 1.1 超音波伝搬特性試験の目的

黒鉛素材には伝搬する超音波ビームに波頭の揺らぎが見られるので、試験体ごとに音速及び減衰特性を測定し、監視ゲート範囲の設定及び対比試験片で設定した基準感度の補正を行う。

#### 1.2 超音波伝搬特性試験の実施時期

超音波探傷試験の前に実施する。

#### 1.3 超音波伝搬特性試験の内容

- a) 音速測定 試験体の片面に加工した垂直 $\phi$ 3mm平底穴、25箇所の音速を測定し、最大、最小、平均音速を求め、探傷時の音速を測定し、監視ゲート範囲を設定する。
- b) 探傷感度補正量測定 試験体の片面に加工した垂直 $\phi$ 3mm平底穴、25箇所中のエコー高さに対比試験片のエコー高さを測定し、探傷時の基準感度の補正を行う。

### 2. 音速測定方法

#### 2.1 試験体

試験体の形状・寸法及び垂直 $\phi$ 3mm平底穴の加工位置を附属書2付図1に示す。

#### 2.2 超音波探傷システム

試験に用いる超音波探傷器、探触子及び機械式走査装置は、超音波探傷試験に用いるものと同じものを用いる。

#### 2.3 配列形探触子の設置

10.3 b) と同一とする。

#### 2.4 感度設定

平底穴の最大エコー高さが表示器上100%前後となるように感度を設定する。

#### 2.5 走査範囲及び走査ピッチ

- a) X-Y走査 264mm×264mm (Type I 試験体) あるいは321mm×321mm (Type II 試験体) の範囲を、

3mmピッチで走査する。

- b) セクタ走査 屈折角が $-10^{\circ}$ ～ $+30^{\circ}$ の範囲を、屈折角が $1^{\circ}$ ピッチで走査する。
- c) 探触子旋回走査  $0^{\circ}$ ～ $360^{\circ}$ の範囲を、 $30^{\circ}$ ピッチで走査する。

### 2.6 記 録

25箇所表面エコーと平底穴エコーの伝搬時間差と伝搬距離より最大、最低及び平均音速を記録する。

### 3. 探傷感度補正量の測定方法

#### 3.1 試験体及び平底穴

附属書2の2. と同一の試験体とし、附属書2の2. の音速測定で最低のエコー高さを示した平底穴を用いる。

#### 3.2 試験片及び平底穴

Type I 試験体に対してはPh-04形対比試験片の深さ270mmの垂直平底穴、あるいはType II 試験体に対してはPh-05形対比試験片の深さ325mmの垂直平底穴を用いる。

#### 3.3 超音波探傷システム、配列形探触子の設置及び感度設定 附属書2の2. と同一とする。

#### 3.4 走査範囲及び走査ピッチ

- a) X-Y走査 使用する平底穴を中心に $\pm 20\text{mm} \times \pm 20\text{mm}$ の範囲を、1mmのピッチで走査する。
- b) セクタ走査 屈折角が $-10^{\circ}$ ～ $+30^{\circ}$ の範囲を、屈折角が $1^{\circ}$ のピッチで走査する。
- c) 探触子旋回角走査 使用する平底穴が最大エコー高さを示した角度を中心に $\pm 15^{\circ}$ の範囲を、 $5^{\circ}$ のピッチで走査する。

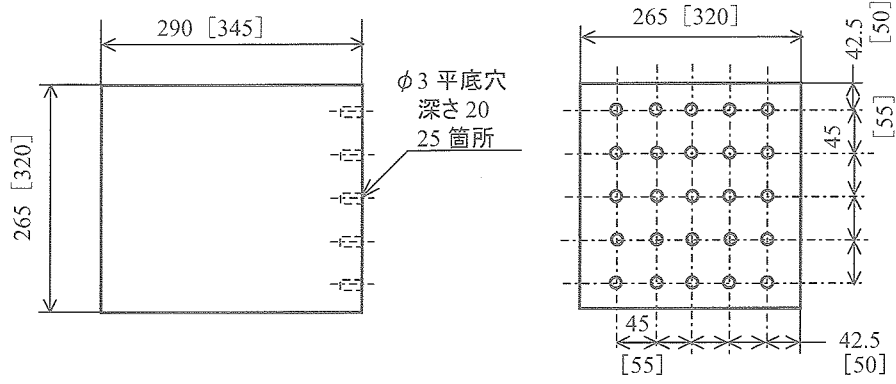
#### 3.6 探傷感度の測定

- a) 試験体の探傷感度の測定 平底穴の最大エコー高さが表示器上100%となるときの感度を、試験体の感度として測定する。
- b) 対比試験片の探傷感度の測定 平底穴の最大エコー高さが表示器上100%となるときの感度を、対比試験片の感度として測定する。

#### 3.7 探傷感度補正量の評価

試験体の感度と対比試験片の感度の差を、探傷感度補正量とする。

(単位 : mm)



附属書2付図1 超音波伝播特性試験時の試験体の形状・寸法と平底穴の加工位置  
寸法はType I 試験体のもので, []内の寸法はType II 試験体のものである

# 黒鉛素材のフェイズドアレイ型超音波自動探傷検査方法 資料

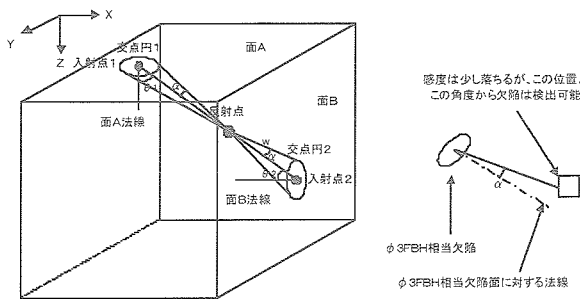
## 1. 探傷範囲設定の根拠及び全方位探傷の確認

### 1.1 目的

超音波探傷試験において、Type I 試験体及びType II 試験体 (5. 付図2) それぞれに対し、検査領域内のあらゆる方位の面状きずを検出するために必要な走査範囲及び監視領域は、9.1表1に与えられる。ここでは、それらの設定、及びあらゆる方位の面状きずが検出されることの確認を、シミュレーションにて実施する。なお、この探傷試験では、検査領域の円柱回転軸が試験体の3軸のどの方向を向いてもよいようにするため、試験体の6つの入射面すべてに同一の探傷領域を設定するものとする。

### 1.2 シミュレーション方法

- 資料図1-1にシミュレーション方法の説明図を示す。ただし対称性より、試験体の1/16の部分(円柱状検査領域の周方向1/8、高さ方向1/2)で計算する。
- 円柱形状検査領域の内部に任意の点を取り、その点から任意の方向に仮想的な超音波ビームを考える。この超音波ビームが試験体表面(入射面)と交差する点を求め、入射点1及び入射点2とする。
- 入射点1及び入射点2における入射面の法線との角度(セクタ走査の屈折角)及び検査対象点までの距離(ビーム路程)を求める。
- きずの反射指向性を考慮し、検査対象点(反射点)から指向角を頂角に持つ円錐と入射面との交点円1及び交点円2を求める。そして、交点円上の点と検査対象点を結ぶ経路の屈折角の中の最小値を求める。この操作は、c)の屈折角及びビーム路程が十分小さな条件の場合には、実施しない。
- 検査領域内すべての点、すべての方向についてb)~d)の操作を行い、ビーム路程と屈折角の相関図を作製する。



資料図1-1 シミュレーション方法の説明図

### 1.3 反射指向性の検討

- 超音波ビームの音軸上の傾いた円形平面きずからの反射強度を、連続波に対して評価する。
- 直径 $a$ 、傾き $\alpha$ のきずの反射指向性係数は、式(1)で与えられる。

$$D_H(\alpha, \beta = -\alpha) = \frac{2J_1(ka \sin \alpha)}{ka \sin \alpha} \quad \dots\dots\dots (1)$$

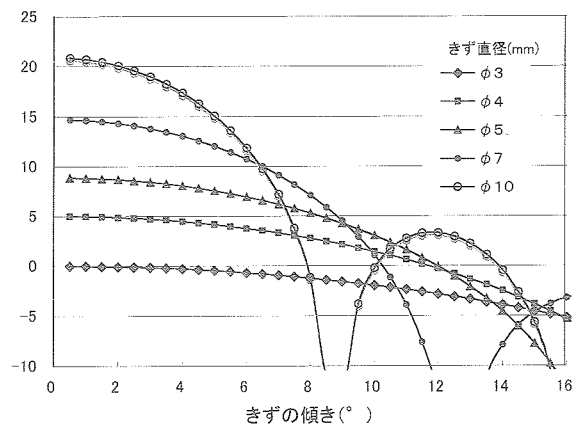
ここに、 $D_H(\alpha, \beta = -\alpha)$  : 直径  $a$ 、傾き  $\alpha$  の円形平面きずの反射指向性  
 $J_1$  : ベッセル関数  
 $k$  : 位相定数

- 直径 $a$ 、傾き $\alpha$ のきずの、直径 $a_0=3\text{mm}$ 、傾き $\alpha_0=0^\circ$ のきずに対するエコー高さの比は、式(2)で与えられる。

$$\frac{P_a^\alpha}{P_{a_0}^{\alpha_0}} = \frac{a^2}{3^2} \frac{2J_1(ka \sin \alpha)}{ka \sin \alpha} \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $P_a^\alpha$  : 直径  $a$ 、傾き  $\alpha$  の円形平面きずのエコー高さ

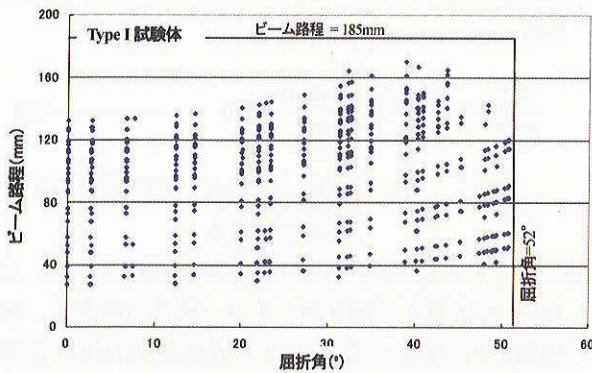
- 各きず寸法におけるきずの反射指向性として、式(2)より計算した傾き角とエコー高さの関係を、資料図1-2に示す。ここでは、周波数1MHz、音速2500m/sとした。 $0^\circ$ きずエコーの1dB低下までを許容すると、 $\phi 3\sim 10\text{mm}$ きずの中では $\phi 3\text{mm}$ きずが許容される傾きが最も小さくなり、指向角は $7^\circ$ となった。なお、この計算は連続波に対するものであり、実際の広帯域のパルス波における指向角は、これよりも大きくなる。



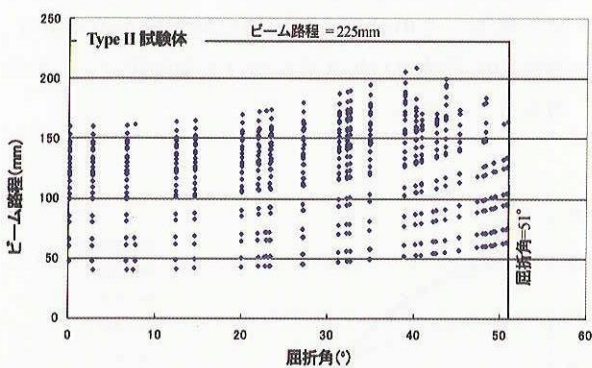
資料図1-2 大きさの異なるきずの反射指向性

#### 1.4 シミュレーション結果による探傷条件の設定

シミュレーションでは、検査対象点を半径2mmピッチ (Type I 試験体) あるいは5mm (Type II 試験体) ピッチ, 周方向2°ピッチ, 深さ10mmピッチ (Type I 試験体) あるいは5mm (Type II 試験体) ピッチで設定し, 各検査対象点からの超音波ビームを水平・垂直方向2°ピッチで設定し, 計算した。必要な探傷条件を分かりやすく示すため, 資料図1-3, 1-4には, それぞれType I 試験体とType II 試験体について, 間引いたデータ点 (半径20mmピッチ, 周方向20°あるいは10°ピッチ, 深さ20mmピッチ, 水平・垂直方向10°ピッチ) を, ビーム路程と屈折角のマップ上にプロットした。細かいピッチでの計算より, Type I 試験体の探傷に必要な最大ビーム路程は185mm, 最大屈折角は52°であり, Type II 試験体の探傷に必要な最大ビーム路程は225mm, 最大屈折角は51°であると求められた。



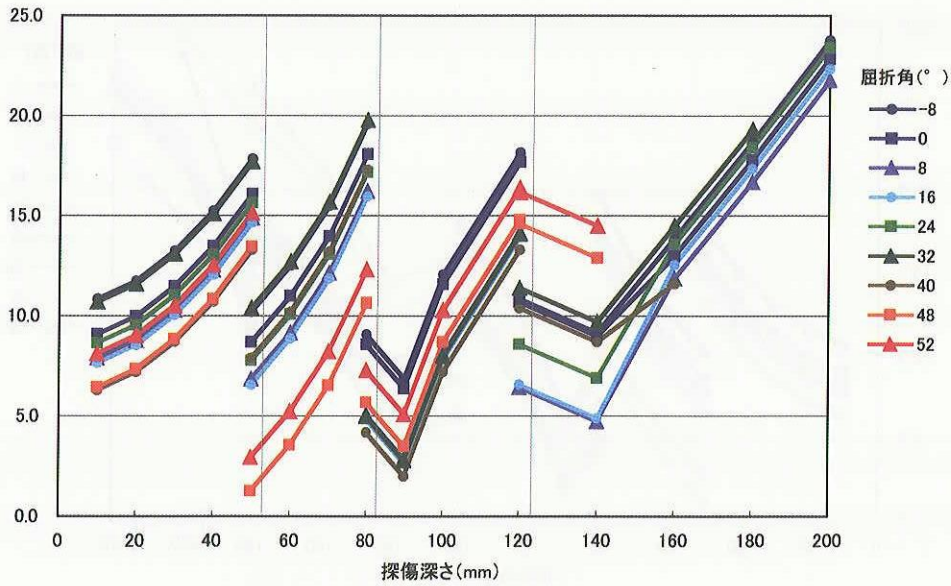
資料図1-3 Type I 試験体の探傷に必要なビーム路程と屈折角の相関図



資料図1-4 Type II 試験体の探傷に必要なビーム路程と屈折角の相関図

#### 2. 距離振幅補償曲線の設定例

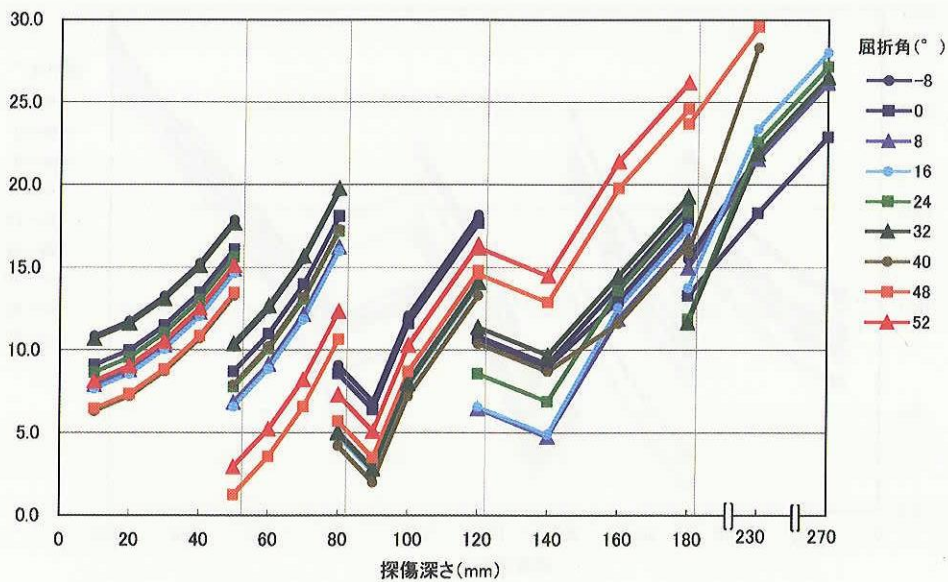
附属書1の5. に従い設定した距離振幅補償曲線の例を示す。Type I 試験体について, 資料図2-1には, 屈折角8°ステップ (含む52°) で距離振幅補償曲線をプロットし, 資料表2-1には, 一次探傷に必要な屈折角について距離振幅補償値をまとめた。Type II 試験体については, 資料図2-2に距離振幅補償曲線, 資料表2-2に一次探傷に必要な屈折角についての距離振幅補償値を示す。なお, どちらの試験体に対しても二次探傷には1°ステップで設定する。このときの基準感度は  $G_R=7\text{dB}$  であった。



資料図2-1 距離振幅補償曲線の設定例 (Type I 試験体) (8°ステップ (含む52°))

資料表2-1 距離振幅補償曲線の設定例 (Type I 試験体、一次探傷用)

探傷深さ範囲 深さ(mm) 屈折角(°)	10mm~50mm					50mm~80mm				80mm~120mm				120mm~185mm			
	10	20	30	40	50	50	60	70	80	80	90	100	120	120	140	160	180
-8	10.9	11.8	13.3	15.3	17.9	10.2	12.5	15.5	19.6	9.1	6.9	12.1	18.2	10.9	9.2	13.9	23.8
-4	10.0	10.9	12.4	14.4	17.0	9.5	11.8	14.8	18.9	8.8	6.6	11.8	17.9	10.8	9.1	13.4	23.3
0	9.1	10.0	11.5	13.5	16.1	8.7	11.0	14.0	18.1	8.6	6.4	11.6	17.7	10.7	9.0	13.0	22.8
4	8.5	9.4	10.9	12.9	15.5	7.8	10.1	13.1	17.2	6.8	4.6	9.8	15.9	8.6	6.9	12.4	22.3
8	7.9	8.8	10.3	12.3	14.9	6.9	9.2	12.2	16.3	5.1	2.9	8.1	14.2	6.5	4.8	11.9	21.8
12	7.6	8.5	10.0	12.0	14.6	6.5	8.8	11.8	15.9	4.4	2.2	7.4	13.5	5.8	4.1	11.9	21.9
16	7.7	8.6	10.1	12.1	14.7	6.6	8.9	11.9	16.0	4.9	2.7	7.9	14.0	6.6	4.9	12.6	22.4
20	7.7	8.6	10.1	12.1	14.7	6.7	9.0	12.0	16.1	5.3	3.1	8.3	14.4	7.4	5.7	13.2	22.9
22	8.2	9.1	10.6	12.6	15.2	7.2	9.5	12.5	16.6	5.5	3.3	8.5	14.6	8.0	6.3	13.4	23.4
24	8.7	9.6	11.1	13.1	15.7	7.8	10.1	13.1	17.2	5.7	3.5	8.7	14.8	8.6	6.9	13.6	23.4
26	9.1	10.0	11.5	13.5	16.1	8.3	10.6	13.6	17.7	5.9	3.7	8.9	15.0	9.2	7.5	13.8	23.7
28	9.6	10.5	12.0	14.0	16.6	8.9	11.2	14.2	18.3	6.1	3.9	9.1	15.2	9.8	8.1	14.0	
30	10.1	11.0	12.5	14.5	17.1	9.4	11.7	14.7	18.8	4.8	2.6	7.8	13.9	10.4	8.7	14.2	
32	10.7	11.6	13.1	15.1	17.7	10.4	12.7	15.7	19.8	5.0	2.8	8.0	14.1	11.4	9.7	14.5	
34	11.3	12.2	13.7	15.7	18.3	11.4	13.7	16.7	20.8	5.2	3.0	8.2	14.3	12.4	10.7	14.8	
36	11.9	12.8	14.3	16.3	18.9	12.4	14.7	17.7	21.8	5.4	3.2	8.4	14.5	13.4	11.7	15.1	
38	12.5	13.4	14.9	16.9	19.5	13.4	15.7	18.7	22.8	5.6	3.4	8.6	14.7	14.4	12.7	15.4	
40	6.3	7.2	8.7	10.7	13.3	7.9	10.2	13.2	17.3	4.2	2.0	7.2	13.3	10.4	8.7	11.6	
44	7.9	8.8	10.3	12.3	14.9	9.5	11.8	14.8	18.9	5.1	2.9	8.1	14.2	12.4	10.7	15.2	
48	6.5	7.4	8.9	10.9	13.5	1.3	3.6	6.6	10.7	5.7	3.5	8.7	14.8	14.6	12.9		
52	8.1	9.0	10.5	12.5	15.1	2.9	5.2	8.2	12.3	7.3	5.1	10.3	16.4	16.2	14.5		



資料図2-2 距離振幅補償曲線の設定例 (Type II 試験体, 8°ステップ (含む52°))

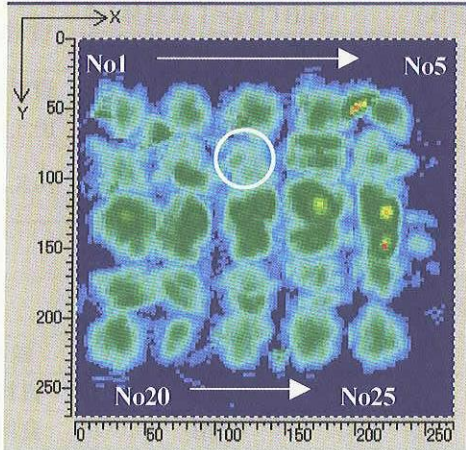
資料表2-2 距離振幅補償曲線の設定例 (Type II 試験体, 一次探傷用)

探傷深さ範囲 深さ(mm) 屈折角(°)	10mm~50mm					50mm~80mm				80mm~120mm				120mm~180mm				180mm~230mm		
	10	20	30	40	50	50	60	70	80	80	90	100	120	120	140	160	180	180	230	270
-8	10.9	11.8	13.3	15.3	17.9	10.2	12.5	10.9	9.2	9.1	6.9	12.1	18.2	10.9	9.2	13.9	18.7	15.5	21.8	26.4
-4	10.0	10.9	12.4	14.4	17.0	9.5	11.8	10.8	9.1	8.8	6.6	11.8	17.9	10.8	9.1	13.4	18.2	14.4	20.1	24.7
0	9.1	10.0	11.5	13.5	16.1	8.7	11.0	10.7	9.0	8.6	6.4	11.6	17.7	10.7	9.0	13.0	17.8	13.3	18.3	22.9
4	8.5	9.4	10.9	12.9	15.5	7.8	10.1	8.6	6.9	6.8	4.6	9.8	15.9	8.6	6.9	12.4	17.2	14.1	19.9	24.5
8	7.9	8.8	10.3	12.3	14.9	6.9	9.2	6.5	4.8	5.1	2.9	8.1	14.2	6.5	4.8	11.9	16.7	15.0	21.6	26.2
12	7.6	8.5	10.0	12.0	14.6	6.5	8.8	5.8	4.1	4.4	2.2	7.4	13.5	5.8	4.1	11.9	16.7	14.9	22.7	27.3
16	7.7	8.6	10.1	12.1	14.7	6.6	8.9	6.6	4.9	4.9	2.7	7.9	14.0	6.6	4.9	12.6	17.4	13.8	23.4	28.0
20	7.7	8.6	10.1	12.1	14.7	6.7	9.0	7.4	5.7	5.3	3.1	8.3	14.4	7.4	5.7	13.2	18.0	12.7	24.1	28.7
22	8.2	9.1	10.6	12.6	15.2	7.2	9.5	8.0	6.3	5.5	3.3	8.5	14.6	8.0	6.3	13.4	18.2	12.3	23.3	27.9
24	8.7	9.6	11.1	13.1	15.7	7.8	10.1	8.6	6.9	5.7	3.5	8.7	14.8	8.6	6.9	13.6	18.4	11.9	22.6	27.2
26	9.1	10.0	11.5	13.5	16.1	8.3	10.6	9.2	7.5	5.9	3.7	8.9	15.0	9.2	7.5	13.8	18.6	11.4	21.8	26.4
28	9.6	10.5	12.0	14.0	16.6	8.9	11.2	9.8	8.1	6.1	3.9	9.1	15.2	9.8	8.1	14.0	18.8	11.0	21.1	25.7
30	10.1	11.0	12.5	14.5	17.1	9.4	11.7	10.4	8.7	4.8	2.6	7.8	13.9	10.4	8.7	14.2	19.0	10.6	20.3	24.9
32	10.7	11.6	13.1	15.1	17.7	10.4	12.7	11.4	9.7	5.0	2.8	8.0	14.1	11.4	9.7	14.5	19.3	11.7	21.9	26.5
34	11.3	12.2	13.7	15.7	18.3	11.4	13.7	12.4	10.7	5.2	3.0	8.2	14.3	12.4	10.7	14.8	19.6	12.7	23.5	
36	11.9	12.8	14.3	16.3	18.9	12.4	14.7	13.4	11.7	5.4	3.2	8.4	14.5	13.4	11.7	15.1	19.9	13.8	25.1	
38	12.5	13.4	14.9	16.9	19.5	13.4	15.7	14.4	12.7	5.6	3.4	8.6	14.7	14.4	12.7	15.4	20.2	14.8	26.7	
40	6.3	7.2	8.7	10.7	13.3	7.9	10.2	10.4	8.7	4.2	2.0	7.2	13.3	10.4	8.7	11.6	16.4	15.9	28.3	
44	7.9	8.8	10.3	12.3	14.9	9.5	11.8	12.4	10.7	5.1	2.9	8.1	14.2	12.4	10.7	15.2	20.0	19.0	28.9	
48	6.5	7.4	8.9	10.9	13.5	1.3	3.6	14.6	12.9	5.7	3.5	8.7	14.8	14.6	12.9	19.8	24.6	23.7	29.6	
52	8.1	9.0	10.5	12.5	15.1	2.9	5.2	16.2	14.5	7.3	5.1	10.3	16.4	16.2	14.5	21.4	26.2			

### 3. 探傷感度補正量の測定例

#### 3.1 試験体の音速測定

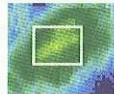
平底穴25個を加工したType I 試験体の音速測定（附属書2の2.）における、試験体全面のCスコープ画像を資料図3.1に示す。ここで、25個の平底穴の中でエコー高さ最低のものはNo. 8平底穴であった。



資料図3.1 試験体の音速測定におけるCスコープ画像

#### 3.2 試験体の探傷感度測定

試験体の探傷感度測定（附属書2の3.6 a））における、No. 8平底穴のCスコープ画像を資料図3.2に示す。このとき、感度19.0dBでエコー高さ95%であったので、試験体の探傷感度は19.4dBと求められた。



資料図3.2 試験体の探傷感度測定におけるNo. 8平底穴のCスコープ画像

#### 3.3 対比試験片の探傷感度測定

Ph-04形対比試験片の探傷感度測定（附属書2の3.6b））における、深さ270mmの垂直平底穴のCスコープ画像を資料図3.3に示す。ここで、(a)は一次探傷に相当するピッチでの探傷、(b)は二次探傷に相当するピッチでの探傷である。(b)において、感度17.0dBでエコー高さ94%であったので、対比試験片の探傷感度は17.5dBと求められた。



資料図3.3 対比試験片の探傷感度測定における深さ270mmの垂直平底穴のCスコープ画像

- (a) 一次探傷に相当するピッチでの探傷  
(b) 二次探傷に相当するピッチでの探傷

#### 3.4 探傷感度補正量

この試験体の探傷感度補正量は、19.4dB-17.5dB=+1.9dBより、+2dBとした。

### 4. 探傷感度の設定例

#### 4.1 探傷感度の設定例の概要

- a) 一次探傷 一次探傷における探傷感度の設定例を、資料表4-1にまとめる。  
b) 二次探傷 二次探傷における探傷感度の設定例を、資料表4-2にまとめる。

#### 4.2 X-Y走査ピッチにおける感度補正量の測定例

附属書1の6. による、X-Y走査ピッチにおける感度補正量の測定例として、資料図4-1及び資料図4-2に、探触子をそれぞれX方向（探触子幅方向）及びY方向（探触子配列方向）に移動したときの、探触子移動距離と相対エコー高さ（dB）の測定結果を示す。資料図4-3は、X方向及びY方向に同時に等距離（45°方向に）移動したときのエコー高さの低下を、移動距離に対してプロットしたもので、探触子を45°方向に移動したときの移動距離とエコー高さの関係にあたる。

移動によるエコー高さの低下は、あまり深さに依存していないが、深さの浅いところのみ、X方向では低下が小さく、Y方向では低下が大きい。その結果、両者の和である、X-Y方向同時移動においては、深さの依存性はあまり見られない。一次探傷における3mmピッチの走査では、走査ピッチの端（±1.5mm）で、エコー高さは最大1.8dB低下している。したがって、X-Y走査ピッチにおける感度補正量は、Type I 試験体及びType II 試験体の両者に対して、1.8dBとした。一方、二次探傷におけるX-Y方向1mmピッチの走査では、エコー高さは最大0.4dB低下しており、X-Y走査ピッチにおける感度補正量は0dBとした。



資料表4-1 一次探傷における探傷感度の設定例のまとめ

項目	記号	ピッチ	設定・測定例	備考
基準感度	$G_R$	—	+7dB	資料2.
探傷感度補正量	$\Delta G_T$	—	+2dB	資料3.
X-Y走査ピッチにおける感度補正量	$P_{XY}$	3mm	+2dB	資料4.2
セクタ走査ピッチにおける感度補正量	$P_{SS}$	4° (最大値) (Type I 試験体)	+1dB (Type I 試験体)	資料4.3
		2° (Type II 試験体)	+2dB (Type II 試験体)	
旋回走査ピッチにおける感度補正量	$P_E$	30° (Type I 試験体)	+6dB (Type I 試験体)	資料4.4
		12° (Type II 試験体)	+4dB (Type II 試験体)	
コーナ入射における感度補正量	$\Delta G_C$	—	資料表4-4	資料4.5.
表示器上50%	-6dB	—	-6dB	10.5.1 d)
探傷感度	$G$	—	+12dB (Type I 試験体)	10.5.1 d)
			+11dB (Type II 試験体)	

資料表4-2 二次探傷における探傷感度の設定例のまとめ

項目	記号	ピッチ	設定・測定例	備考
基準感度	$G_R$	—	+7dB	資料2.
探傷感度補正量	$\Delta G_T$	—	+2dB	資料3.
X-Y走査ピッチにおける感度補正量	$P_{XY}$	1mm	+0dB	資料4.2
セクタ走査ピッチにおける感度補正量	$P_{SS}$	1°	+1dB	資料4.3
旋回走査ピッチにおける感度補正量	$P_E$	4°	+1dB	資料4.4
コーナ入射における感度補正量	$\Delta G_C$	—	資料表4-4	資料4.5.
表示器上50%	-6dB	—	-6dB	10.5.1 d)
探傷感度	$G$	—	+5dB	10.5.1 d)

#### 4.3 セクター走査ピッチにおける感度補正量の測定例

附属書1の7. に準拠した、セクタ走査ピッチにおける感度補正量の測定例として、資料図4-4に、屈折角を変えたときの、屈折角と相対エコー高さ (dB) の測定結果を示す。

屈折角によるエコー高さの低下は、深さが大きくなるにつれ大きくなる傾向が見られる。Type I 試験体に必要な深さ185mmまでの範囲では、一次探傷における最大4°ピッチの走査では、走査ピッチの端 ( $\pm 2^\circ$ ) でエコー高さは最大1.2dB低下している。したがって、セクタ走査ピッチにおける感度補正量は1dBとした。Type II 試験体に必要な2°ピッチでの深さ230mmまでの範囲では、走査ピッチの端 ( $\pm 1^\circ$ ) でエコー高さは最大2.0dB低下しており、セクタ走査ピッチにおける感度補正量は2dBとした。

二次探傷における1°ピッチの走査では、走査ピッチの端 ( $\pm 0.5^\circ$ ) でエコー高さは最大0.5dB (Type I 試験体) 及び1.0dB (Type II 試験体) 低下しており、セクタ走査ピッチにおける感度補正量はどちらも1dBとした。

#### 4.4 探触子旋回走査ピッチにおける感度補正量の測定例

附属書1の8. に準拠した、探触子旋回走査ピッチにおける感度補正量の測定例として、資料図4-5に、旋回角を変えたときの、旋回角と相対エコー高さ (dB) の測定結果を示す。

旋回角によるエコー高さの低下は、深さが大きくなるにつれ大きくなる傾向が見られる。Type I 試験体に必要な深さ185mmまでの範囲及びType II 試験体に必要な深さ230mmまでの範囲について、旋回走査ピッチの端での感度低下量を資料表4-3にまとめる。

10.5.1 c) 3) にあるように、一次探傷における旋回走査ピッチは、探傷感度Gが12dB程度になるように資料表4-3から選択する。資料4.1 a) に示した例では、Type I 試験体では、走査ピッチは30°及び感度補正量は6dBとした。また、Type II 試験体では、走査ピッチは12°及び感度補正量は4dBとした。

二次探傷における4°ピッチの走査では、Type I 試験体及びType II 試験体ともに感度補正量は1dBとした。

## 4.5 コーナ入射における感度補正量の測定例

附属書1の9. によるコーナ入射における感度補正量の測定例として、資料図4-6に、送受信素子数を変えた条件での、コーナからの入射位置とエコー高さの測定結果を示す。ここで、送受信素子数は、9.2表2で探傷深さと屈折角に応じて必要となる条件とした。

10.5.1 e) 及び11. にあるように、コーナ入射における感度補正は、判定基準のエコー高さを感度補正量DGCだけ低下させることにより実施する。そこで、各送受信

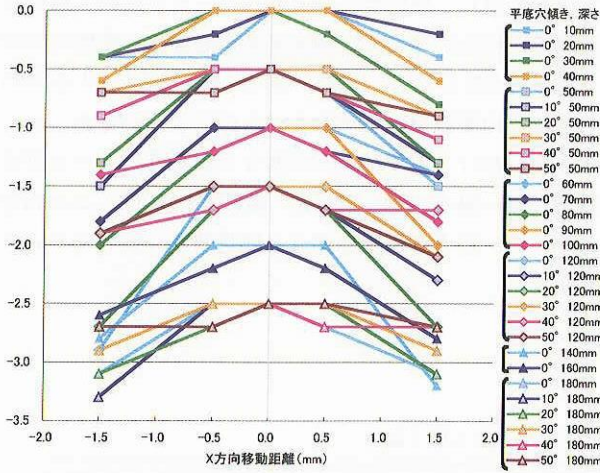
素子数に対し、感度補正が必要なコーナからの入射位置範囲を定めた。そして、感度補正が不要な範囲のエコー高さを50%として、エコー高さ (%) をコーナからの入射位置の関数として求めた。このエコー高さを、コーナ入射における感度補正が必要な入射条件における判定基準エコー高さ (%) となる。資料表4-4には、この判定基準エコー高さを反射源深さと屈折角度でまとめたものを示す。

資料表4-3 旋回走査ピッチ端でのエコー高さ低下量

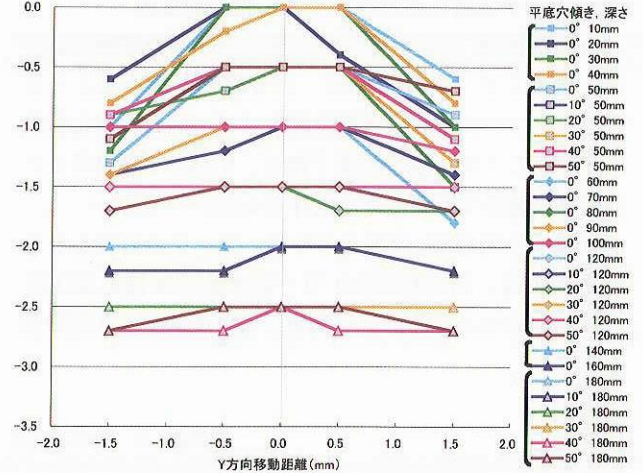
旋回走査ピッチ端		±0.5°	±1°	±2°	±3°	±5°	±6°	±9°	±10°	±15°
エコー高さ	Type I 試験体	-0.2	-0.3	-0.5	-0.9	-1.5	-2.2	-3.8	-4.8	-6.0
低下量 (dB)	Type II 試験体	-0.2	-0.4	-0.6	-1.4	-3.5	-3.7	-5.3	-6.6	-14.0

資料表4-4 コーナ入射における感度補正に対応する判定基準エコー高さ

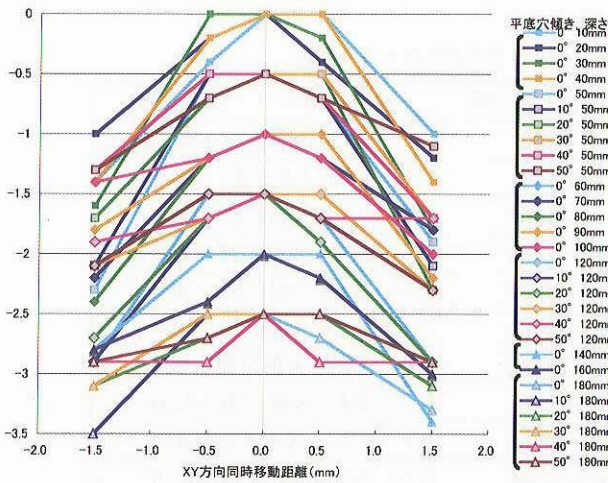
反射源深さ	屈折角度	コーナからの入射位置	判定基準エコー高さ (%)
50mm未満	-10°以上40°未満	5mm～10mm	1.1×入射位置 + 39.0
	40°以上48°未満	5mm～10mm	2.4×入射位置 + 26.0
	48°以上52°以下	5mm～10mm	2.4×入射位置 + 26.0
10mm～20mm		0.65×入射位置 + 39.5	
50mm以上 80mm未満	-10°以上40°未満	5mm～10mm	2.4×入射位置 + 26.0
	40°以上48°未満	5mm～10mm	3.2×入射位置 + 14.0
		10mm～20mm	0.65×入射位置 + 39.5
	48°以上52°以下	5mm～15mm	2.4×入射位置 + 12.0
15mm～30mm		0.35×入射位置 + 41.5	
80mm以上 120mm未満	-10°以上40°未満	5mm～15mm	2.4×入射位置 + 17.5
		15mm～20mm	0.6×入射位置 + 44.5
	40°以上48°未満	5mm～15mm	2.4×入射位置 + 12.0
		15mm～30mm	0.35×入射位置 + 41.5
	48°以上52°以下	5mm～15mm	2.1×入射位置 + 11.0
		15mm～50mm	0.35×入射位置 + 36.0
120mm以上 180mm未満	-10°以上40°未満	5mm～15mm	2.4×入射位置 + 12.0
		15mm～50mm	0.35×入射位置 + 36.0
	40°以上52°以下	5mm～15mm	2.1×入射位置 + 11.0
		15mm～50mm	0.35×入射位置 + 36.0
180mm以上 230mm未満	-10°以上52°以下	5mm～15mm	2.1×入射位置 + 11.0
		15mm～50mm	0.35×入射位置 + 36.0



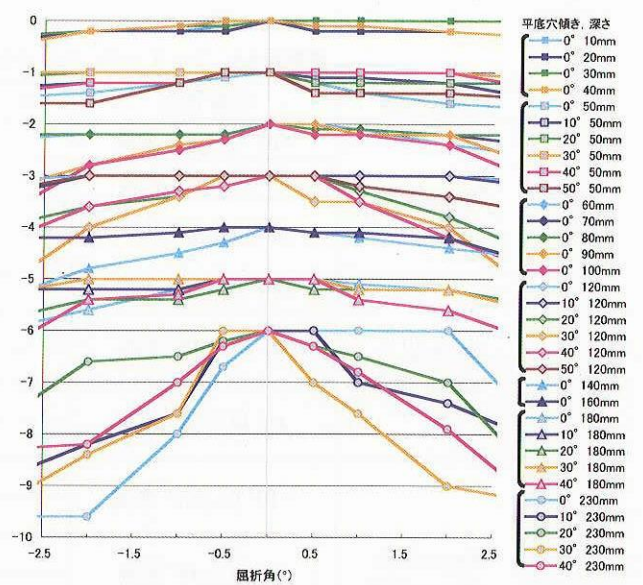
資料図4-1 探触子をX方向（探触子幅方向）に移動したときの探触子移動距離と相対エコー高さ



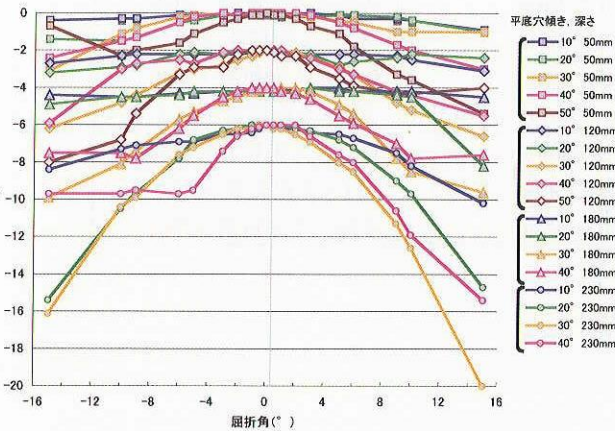
資料図4-2 探触子をY方向（探触子配列方向）に移動したときの探触子移動距離と相対エコー高さ



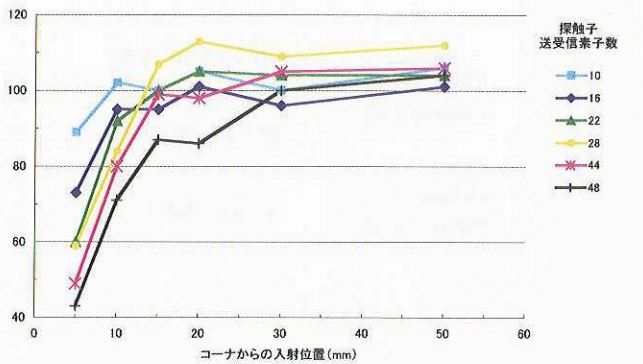
資料図4-3 探触子をX-Y方向に同時に等距離移動したときの同時移動距離と相対エコー高さ



資料図4-4 屈折角を変えたときの相対エコー高さ



資料図4-5 旋回角を変えたときの相対エコー高さ



資料図4-6 異なる開口数の配列形探触子におけるコーナからの探触子中心位置とエコー高さの測定結果

5. フェーズドアレイ型自動探傷法及び一探触子自動探傷法の欠陥検出性の検証

5.1 目的

模擬欠陥を内在する黒鉛について、従来の一探触子自動探傷法（JIS Z 2356 黒鉛素材の超音波自動探傷検査方法）とこの規格のフェイズドアレイ型自動探傷法で探傷を行ない、両者の欠陥検出性の検証を行った。すなわち、模擬欠陥入りの大型素材を作製し、この素材から立方体形状試験体を切り出し、フェーズドアレイ型自動探傷を行った後、円柱形状試験体に機械加工し、一探触子自動探傷を行った。その後、検出したきずを含む薄い円板形状試験体を切り出し、X線透過試験を実施したがきずは検出できなかった。そこで、一探触子垂直法により、円板試験体の上下面から手動探傷を行った。

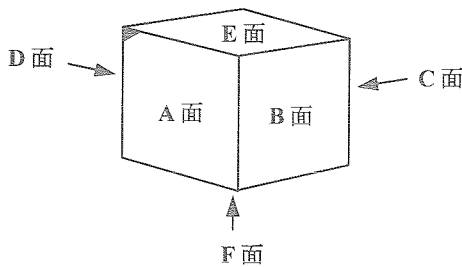
5.2 探傷方法

5.2.1 試験体作製

黒鉛素材の静水圧成形前に、種々の大きさの複数の紙片を原料粉末中に混入させ、その後静水圧成形、焼成することにより、紙片の部分が割れとなった、模擬欠陥入りの大型素材を作製した。この素材中の模擬欠陥の位置、方向、大きさは制御不能である。

5.2.2 フェーズドアレイ型自動探傷法

焼成した大型素材から、一辺265mmの立方体試験体を切り出し、フェーズドアレイ型自動探傷用の試験体とした。試験体形状を資料図5-1に示す。この試験体に対し、この規格の一次探傷を実施した。



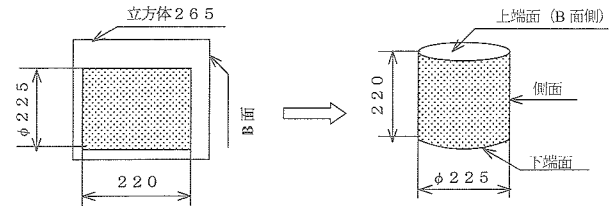
サイズ：立方体 265mm

資料図5-1 フェイズドアレイ型自動探傷試験体の形状・寸法・探傷面

5.2.3 一探触子自動探傷法

一探触子法による自動探傷の試験体は、立方体形状の試験体から円柱形状に機械加工した。立方体からの採取方法および試験体形状を資料図5-2に示す。この試験体に対し、JIS Z 2356 黒鉛素材の超音波自動探傷検査方

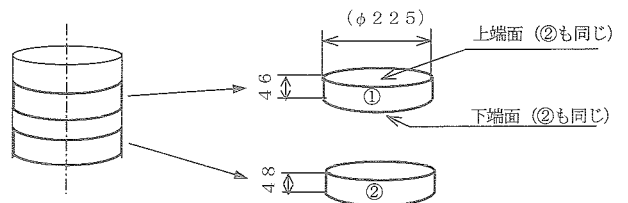
法に基づき、一次探傷を実施した。ここでは、超音波探傷器としてUSD15（クラウトクレマー社製）、探触子としてセラミックス・ポリマーコンポジット探触子である2.25K25.4Iを用いた。



資料図5-2 一探触子自動探傷用の試験体採取方法及び試験体形状・寸法・探傷面

5.2.4 一探触子垂直法による手動探傷

一探触子自動探傷により検出したきず位置が厚さ方向のほぼ中心となるようにして、きずNo.IときずNo.IIを含む厚さ46mmの円板及びきずNo.IIIを含む48mmの円板を切り出した（資料図5-3）。それぞれの円板試験体に対し、X線透過試験を実施したがきずは検出できなかった。次に、一探触子直接接触パルス反射垂直法により、円板試験体の上下面から手動探傷を行った。ここでは、探傷器としてEPOCH-4（パナメトリクス社製）、探触子として2.25C13Nを用いた。探傷結果はCスコープ表示を行い、きずの中心位置を求め、6dBドロップ法によりその大きさ（参考値）を求めた。ただし、この方法ではきずの方向は同定できていない。



資料図5-3 一探触子垂直法による手動探傷用の試験体採取方法及び試験体形状・寸法・探傷面

5.3 探傷結果

a) 3種の探傷方法により検出したきずの位置のプロットを資料図5-4に示す。模擬欠陥と判断されるきずの検出数は、3種の探傷方法とも3ヶ所である。資料図5-5には、きずの基準位置とした一探触子垂直法によるCスキャン像を示す。それぞれの探傷方法において、きずの位置は、基準感度以上のエコーの分布の中心とした。

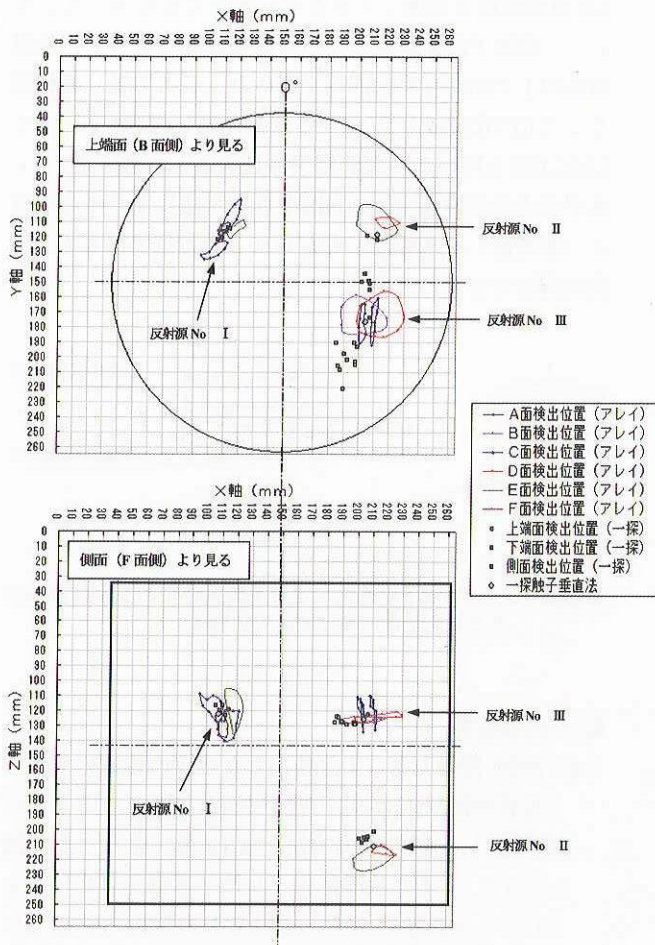
- b) 3種の探傷方法により検出したきず位置の座標及び一探触子垂直法により求めたきずの寸法を、資料表5-1にまとめた。きず位置の基準位置との差は、一探触子自動探傷法では最大19mm、フェーズドアレイ型自動探傷法では最大11mmであった。
- c) 反射源のエコー高さについては、各探傷方法とも

感度設定が異なるため比較対象外とした。

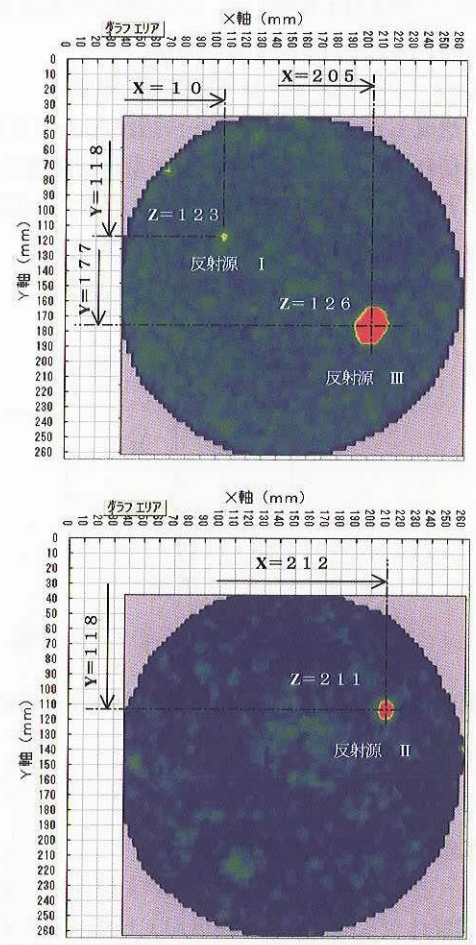
- d) 一探触子自動探傷法及びフェーズドアレイ型自動探傷法を用いた大型試験体の探傷と、薄い円板試験体にしてからの一探触子垂直法による探傷は、お互いによく一致した位置に3個のきずを検出した。

資料表5-1 各探傷法による反射源検出位置と基準位置との差

きず No.	一探触子垂直法					一探触子自動探傷法			フェーズドアレイ型自動探傷法		
	きず位置座標 (mm)			きず寸法 (mm)		きず位置座標 (mm)			きず位置座標 (mm)		
	X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	X	Y	Z
I	108	118	123	2	4	110	118	120	112	116	124
						基準位置との差 4mm			基準位置との差 5mm		
II	212	118	211	5	10	208	136	205	214	110	218
						基準位置との差 19mm			基準位置との差 11mm		
III	205	177	126	24	25	200	188	126	208	174	123
						基準位置との差 12mm			基準位置との差 5mm		



資料図5-4 きず位置プロット図



資料図5-5 一探触子垂直法によるCスコープ画像

## 6. 水浸用アレイプローブ装置（特許出願書類）

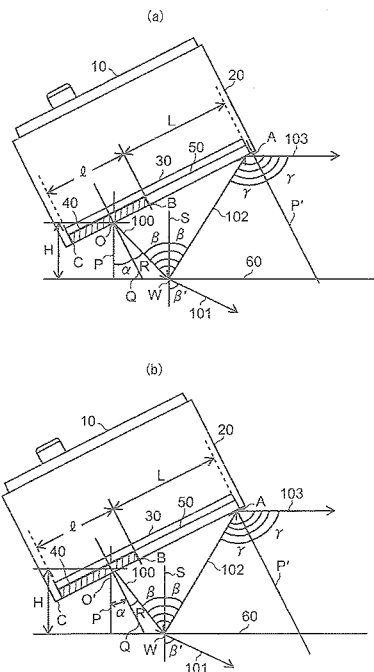
【書類名】要約書

【要約】

【課題】超音波ビーム角度偏向する水浸用アレイプローブを使用した探傷において、どの探傷角度でも水浸用アレイプローブの端部がノイズエコーの原因とならないあるいは小さくすることのできる水浸用アレイプローブ装置を提供する。

【解決手段】送受信エレメント群からの超音波が最大偏向角度  $R$  の範囲でもって検査面に照射されたときに、前記高さ  $H$  および最大偏向角度  $R$  で定まる検査面から反射した超音波がダミーエレメント群の最外端の範囲内に設定される。

【選択図】図2



【書類名】特許請求の範囲

【請求項1】

超音波を送受信する送受信エレメント群からなるアレイ素子と超音波を送受信しないダミーエレメント群からなるアレイ素子とから構成される平板状の水浸用アレイプローブと、前記水浸用アレイプローブを水中で支持するケースとを有し、前記平板状の水浸用アレイプローブは検査面に対して予め定められた角度  $\alpha$ （前記水浸用アレイプローブの検査面に対する法線と前記水浸用アレイプローブについての垂直線とのなす角度）および送受信エレメント群の中心に位置する送受信エレメントが検査面に対してなす一定の高さ  $H$  で、および送受信エレメント群からの超音波が角度  $\alpha$

に対する予め定められた最大偏向角度  $R$  でもって照射されるようにした水浸用アレイプローブ装置において、

送受信エレメント群からの超音波が最大偏向角度  $R$  の範囲でもって検査面に照射されたときに、前記高さ  $H$  および最大偏向角度  $R$  で定まる検査面から反射した超音波が前記ダミーエレメント群の最外端の範囲内に設定されていること

を特徴とする水浸用アレイプローブ装置。

【請求項2】

請求項1において、反射した超音波が前記ダミーエレメント群の必要最遠位置と交わる点と必要最近位置と交わる点との長さを  $L$  としたときに、当該長さ  $L$  は前記送信エレメント群からなるアレイ素子の長さ  $l$  よりも長くなるように前記高さおよび最大偏向角度  $R$  が設定されていることを特徴とする水浸用アレイプローブ装置。

【請求項3】

請求項1または2において、超音波を送受信する前記送受信エレメント群からなるアレイ素子と超音波を送受信しない前記ダミーエレメント群からなるアレイ素子とは、境界領域を置くことなく一体に構成されることを特徴とする水浸用アレイプローブ装置。

【書類名】明細書

【発明の名称】水浸用アレイプローブ装置

【技術分野】

本発明は、アレイプローブを用い、水浸法にて超音波探傷を実施する水浸用アレイプローブ装置に関する。

【背景技術】

物体内の割れ等を超音波で検出する場合に、超音波プローブを直接、被検査体の表面上に接触させ検査する直接接触探傷法と、被検査体を水中に設置し、ある距離を離して、探傷する水浸探傷法がある。これらの手法は非特許文献1等に詳しく述べられている。一方、被検査体内の割れの方角、傾きが一定でない場合、超音波ビームを割れに対し直交した方向から送受信しないと検出が困難となる。

その為、超音波プローブを被検査体表面に対し斜めに傾け、超音波ビームを斜めに入射等の条件下でさせる斜角探傷法を実施する必要がある。直接接触法ではアクリル等のシューを使用し、水浸法では超音波プローブを傾けて、超音波ビームを斜めに入射させる方法が取られている。この場合、被検査体の表面ではね返った超音波は、直接接触法の場合では、シュー内の超音波がはね返った場所にアクリルクサビを設置する

等の工夫により超音波を減衰させ、超音波の更なる反射により超音波プローブにノイズとして検出されない様な構造となっている。一方、水浸法では、一般的に使用されているものは1個の振動子よりなるシンプルプローブのため、ビームの向きも一定であり、手間を掛ければ表面ではね返った超音波に影響されない様角度・高さ等を考慮に入れて設定する事ができる。すなわち、被検査体の表面ではね返った超音波は、シングルプローブでは、検出できない方向へ進行していき、ノイズとして検出されない形となっている。

上記に示したのは、固定角探触子を使用した場合であり、検出できる割れ等の角度は限定されてしまう。これに対し、色々な方向の割れを検出する為に、フェーズドレイ技術を用いた、新たな手法が開発されて来た。

水浸用アレイプローブ装置を用いた全方位の割れを検出するシステムは、非特許文献2等にその内容が記載されている。このシステムでは、被検査体の表面からの超音波の多重反射防止と、超音波ビーム角度偏向時の検出強度確保の為、水浸用アレイプローブを20度傾けてある。この角度は被検査体と水の音速の関係により決まってくる為、それぞれの探傷システムで最適値は異なってくる。

水浸用アレイプローブ装置で超音波ビームの角度を大きく変化させると、探傷角度により、被検査体表面にてはね返った超音波が、水浸用アレイプローブの端部にぶつかり、多重反射の後に戻ってきて、ノイズとして検出する場合がある。水浸用アレイプローブの端部に反射防止部材を設置する等の対策がとられているが、完全にはとりきれない。

アレイプローブに関するノイズ等の低減策として、特許文献1等があるが、探傷データの周波数等の重みづけ等に関するもので、水浸用アレイプローブの端部の反射するノイズエコーについて考慮されていない。

【特許文献1】超音波探傷法 特開2001-343370

【非特許文献1】超音波探傷試験Ⅲ（日本非破壊検査協会1987年発行）P95, 96等

【非特許文献2】黒鉛素材の全方向探傷用電子走査式アレイ型超音波探傷システムの開発（(社)日本非破壊検査協会 非破壊検査第53巻7号抜粋）

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

本発明の目的は、超音波ビームを角度偏向する水浸用アレイプローブを使用した探傷において、どの探傷角度でも水浸用アレイプローブの端部がノイズエコーの原因とならない、あるいは小さくすることのできる

水浸用アレイプローブ装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

ノイズエコーが検出されるのは、水浸用アレイプローブの端部において、反射が一様でなく、色々な方向に超音波が散乱されることが一要因となっていることに着目して、本発明は、色々な探傷角度においても、水浸用アレイプローブの端部を直接超音波があたる部位としない様にするために、一様な反射面で超音波を受ければ、検出側と反対方向に超音波は反射していくことを実現するため、一定の長さ領域において一様な反射面を実現するダミーエレメントで延長した水浸用アレイプローブを備えたことを特徴とする。

本発明は、具体的には送受信エレメント群からなるアレイ素子と超音波を送受信しないダミーエレメント群からなるアレイ素子とから構成される平板状の水浸用アレイプローブと、前記水浸用アレイプローブを水中で支持するケースとを有し、前記平板状の水浸用アレイプローブは検査面に対して予め定められた角度 $\alpha$ （試験体検査面の法線と水浸用アレイプローブの垂線とのなす角度）および送受信エレメント群の中心に位置する送受信エレメントが検査面に対してなす一定の高さHで、および送受信エレメント群からの超音波が角度 $\alpha$ に対する予め定められた最大偏向角度Rでもって照射されるようにした水浸用アレイプローブ装置において、

送受信エレメント群からの超音波が最大偏向角度Rの範囲でもって検査面に照射されたときに、前記高さHおよび最大偏向角度Rで定まる検査面から反射した超音波が前記ダミーエレメント群の最外端の範囲内に設定されていること、を特徴とする水浸用アレイプローブ装置を提供する。

また、本発明は、上述の水浸用アレイプローブ装置において、反射した超音波が前記ダミーエレメント群の必要最遠位置と交わる点と必要最近位置と交わる点との長さをLとしたときに、該長さLは前記送信エレメント群からなるアレイ素子の長さ $l$ よりも長くなるように前記高さおよび最大偏向角度Rが設定されていることを特徴とする水浸用アレイプローブ装置を提供する。

また、本発明は、上述の水浸用アレイプローブ装置において、超音波を送受信する前記送受信エレメント群からなるアレイ素子と超音波を送受信しない前記ダミーエレメント群からなるアレイ素子とは、境界領域を置くことなく一体に構成されることを特徴とする水浸用アレイプローブ装置を提供する。

## 【発明の効果】

本発明によれば、水浸用アレイプローブを用いた水浸探傷において、色々な探傷角度においても、水浸用アレイプローブの端部ではね返える超音波を低減し、ノイズとして検出しない水浸用アレイプローブ装置を提供することができる。

## 【発明を実施するための最良の形態】

以下、本発明の実施例を図面に基づいて説明する。

## 【実施例】

図1において、本発明の実施例である水浸用アレイプローブ装置10は、超音波を送受信する送受信エレメント群からなるアレイ素子40と超音波を送受信しないダミーエレメント群からなるアレイ素子50とから構成される平板状の水浸用アレイプローブ30と、水浸用アレイプローブ30を水中で支持するケース20とを有して構成される。

そして、この水浸用アレイプローブ装置10は、平板状の水浸用アレイプローブ30が検査面60に対して予め定めた角度（試験体検査面60の法線と水浸用アレイプローブ30の垂線とのなす角度）および送受信エレメント群の中心に位置する送受信エレメント群が検査面60に対してなす一定の高さで、および送受信エレメント群からの超音波が角度に対する予め定められた最大偏向角度でもって照射されるようにして構成される。

アレイ素子の送受信エレメント群から照射された超音波ビーム100は、被検査体の検査面60の表面で屈折し、探傷用ビーム101として、被検査体内に投入される。一方、表面Wで反射したビーム102は水浸用アレイプローブ30のアレイ素子50のダミーエレメント群にぶつかり、超音波が外側に逃げて行き、反射エコーは無くなっていく。

本実施例の水浸用アレイプローブ装置10は、送受信エレメント群からの超音波が細大偏向角度Rの範囲でもって検査面に照射されたときに、前記高さHおよび細大偏向角度Rで定まる検査面から反射した超音波が前記ダミーエレメント群の最外端の範囲内に設定されていることによって反射する超音波が送受信エレメント群に戻らない構成としている。

以下、図2を使用して詳述する。

図2(a)は全域の送受信エレメント群を使用した場合の例を示し、図2(b)は一部の送受信エレメント群を使用した場合の例を示す。

図2(b)において、水浸用アレイプローブ装置10は、超音波を送受信する送受信エレメント群からなるアレイ素子40と超音波を送受信しないダミーエレメント群からなるアレイ素子50とから構成される平板状の水浸

用アレイプローブ30と、水浸用アレイプローブ30を水中で支持するケース20とを有して構成される。

そして、この水浸用アレイプローブ装置10は、平板状の水浸用アレイプローブ30が検査面60に対して予め定められた角度 $\alpha$ （水浸用アレイプローブ30の検査面60に対する法線Pが水浸用アレイプローブ30についての垂直線Qとのなす角度）および送受信エレメント群が検査面60に対してなす一定の高さHで、および送受信エレメント群からの超音波が角度 $\alpha$ に対する予め定められた最大偏向角度Rでもって照射されるようにして構成される。ここでいう最大とは、効果的に行う実際上の最大と理解するべきである。

アレイ素子40の送受信エレメント群から照射された超音波ビーム100は、検査面60で検査面60に対する法線Sに対して $\beta$ の角度で照射され、 $\beta$ の角度で反射する。被検査体内に投入される探傷用ビーム101は、一般的には被検査体の音速が水の音速より早い為、屈折角 $\beta'$ は $\beta$ よりも大きくなる。

一方、表面Wで反射した超音波ビーム102は水浸用アレイプローブ30のアレイ素子50のダミーエレメント群にぶつかって更に反射する。この場合に、高さHが予め定められ、角度 $\alpha$ が定まると反射角度 $\beta$ は定まり、これに伴ってダミーエレメント群にぶつかる。すなわち、交わる点A点が一義的に定まる。

このA点がダミーエレメント群の範囲内ないと、反射した超音波ビーム102はケース20の角などにぶつかって乱反射し、ノイズエコーとなるおそれがある。このために、このA点はダミーエレメント群の範囲内になるように計算設計し、A点を定め、A点を越えて外方にダミーエレメント群が延在するように設定することを行う。このようにA点を定め、仮にA点がダミーエレメント群の最終端部より内側に設定されたとするとA点到達した超音波ビーム102はダミーエレメント群の法線P'に対して $\gamma$ の反射角で外方に線103で示すように反射し、W点側に戻ることがない。

アレイ素子40の一端をCとし、アレイ素子50との境界をBとして、C-Bの長さを $l$ 、B-Aの長さを $L$ とした場合に、好ましい例としては長さ $L$ は送信エレメント群からなるアレイ素子の長さ $l$ よりも長くなるように前述した高さHおよび最大偏向角度Rの設定を行うことでもある。

反射した超音波ビーム102がダミーエレメント群の必要最遠位置と交わる点Aと必要最近位置と交わる点Bとの長さ $L$ は長さ $l$ よりも長くするのが好ましい。ダミーエレメント群の必要最遠位置を越えて、すなわち延在させることができる。



反射する超音波103の反射状況を見て、点Aが最大偏向角度Rの範囲内に設定されているかが判断される。超音波を送受信する送受信エレメント群からなるアレキ素子40と超音波を送受信しない前記ダミーエレメント群からなるアレキ素子50とは、境界領域を置くことなく一体に構成することが望ましい。

図2(a)の例では、アレキ素子40の送受信エレメント群を全部使用して計測する場合について説明した。この場合にはアレキ素子40の中央位置に位置する受信エレメントが中央点Oで設定される。

アレキ素子40の送受信エレメント群を全部使用しなくても部分的に使用しても計測することが可能である。例えば、右側半分のアレキ素子40を使用することである。図2(a)は一部のエレメント群を使用する場合であり、この場合中央点はO'となるが高さHはそのままの条件で計算に使用することができることは明らかである。

図3にダミーエレメント群501を付設した水浸用アレキプローブ30の構造例を示す。図3(a)は縦断面図であり、図3(b)は図3(a)をX方向(水浸用アレキプローブ30の探傷面側)から見た図である。

図4(b)において、送受信エレメント群のアレキ素子40の送受信エレメント群401と超音波を送受信しないダミーエレメント群のアレキ素子50のダミーエレメント群501は境界領域のない様な反射特性を有する構造を作っている。

以上述べたように、必要とするあらゆる角度の超音波ビームが被検査体表面で反射し、水浸用アレキプローブ30の表面延長線と交わる領域まで、水浸用アレキプローブ30を延長する事により、端部エコーを防止する事が可能となる。延長部分を設ける事により、端部エコーを発生させずに、超音波を水浸用アレキプローブ30の延長部分で、一様に、検出側から遠ざかる方向に反射させることにより、ノイズ防止が図れるため、雑音レベルの低い水浸用アレキプローブ装置を提供できる。

図4-図6はデジタル電子スキャン方式を示す図である。

図4において、61は超音波遅延回路を示し、62は超音波送信パルスを示す。この超音波振動子素子群によって超音波を送受信する送受信エレメント401が構成される。図4に示すように、超音波遅延回路61を使用して超音波送信パルス62の遅延時間を電子制御し、超音波ビーム102の焦点深さ制御や角度制御を行う。この制御の仕方を予め設定することによって最大偏向角度Rが定められ、この最大偏向角度R内での偏向角度

が決定され、使用される。

図4(a)は焦点深さ制御をしている状態を示す図であり、板厚方向探傷で、超音波ビーム102の焦点深さを可変とすることができる。図4(b)は偏向角度制御をしている状態を示す図であり、斜角探傷で、探傷角度を可変とすることができる。

図5は受信回路およびリアルタイム表示構成を示す図である。

図5において、リアルタイム表示装置200は、電子スキャンユニット201およびデータ収録処理ユニット202から構成される。

電子スキャンユニット201は、遅延回路(超音波遅延回路)61、A/D62に接続された増幅器64および加算回路65から構成され、データ収録処理ユニット202は、加算回路65に接続された波形収録回路66およびCPU67から構成されるこれらの構成によって全波形データ収録、再生表示、カラー高精細表示機能により、検査性を向上させることができる。得られたデータをリアルタイムで表示することができる。

図6は送信回路を示す図である。

図6において、61は遅延回路(超音波遅延回路)であり、71はスイッチ回路、72はスクエアパルス発生回路である。遅延回路61で図4に示すように遅延された信号はスイッチ回路71に伝えられ、これによってスクエアパルス発生回路72によってスクエアパルスが発生され、100V~300Vの信号として超音波振動子素子群63に伝えられる。

このように、高出パルス信号を発生させるために、超音波振動子素子ごとに図6に示す回路を装着している。これによって遠距離、高減衰材などに対しても電子スキャン方式探傷が可能になる。

本実施例によれば、グラファイト、複合材料、樹脂などの新素材の探傷、車軸、レール、ノズル部などの金属材料の探傷、配管、圧力容器、フランジなどの溶接部の探傷あるいは鉄のアルミ、金属・樹脂などの異種材料複合部の探傷を安全、高精度に行い、超音波検査結果をリアルタイムに表示することができ、高精度な波形再生を可能とする。

図7は、本実施例のダミーエレメント501を設置しない対策前(図7(a))とダミーエレメント501を設置しない対策前(図7(a))とダミーエレメント501を設置した対策後(図7(b))の探傷結果を示す表示側である。

図8は、図7の表示例を判り易くするために模式的に示す図である。

これらの図によれば、対策前にあっては水浸用アレ

イプローブ30の先端部Cによって乱反射された超音波による先端擬似エコーが大きく観測され、C点ノイズおよび欠陥画像が表示されているが、対策後には先端擬似エコーが小さく観測され、欠陥画像のみが表示されることが判る。このように、対策後には端部からのノイズエコーが低減されていることが判る。

【図面の簡単な説明】

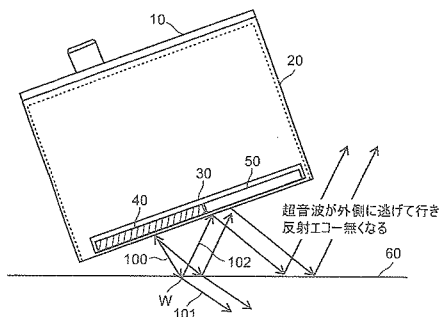
- 【図1】 本発明の実施例の概略構成を示す図。
- 【図2】 本発明の実施例の詳細構成を示す図。
- 【図3】 図2に示す構成の一部詳細図。
- 【図4】 デジタル電子スキャン方式を示す図。
- 【図5】 リアルタイム表示手段を示す図。
- 【図6】 探傷回路の構成を示す図。
- 【図7】 本実施例の対策を行った場合と対策を行う前の探傷結果を対比して示す表示例図。
- 【図8】 図7の模式図。

【符号の説明】

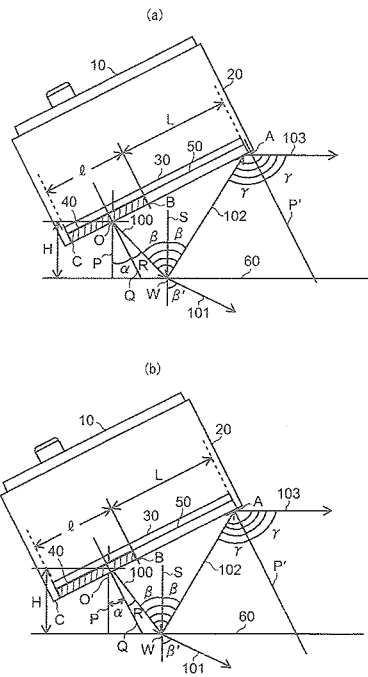
10…水浸用アレイプローブ装置、20…ケース、30…水浸用アレイプローブ、40…送受信エレメント群からなるアレイ素子、50…超音波を送受信しないダミーエレメント群からなるアレイ素子、60…検査面、61…遅延回路（超音波遅延回路）、62…超音波送信パルス、100…超音波ビーム、102…反射した超音波ビーム、401…送受信エレメント、501…ダミーエレメント、 $\alpha$ …水浸用アレイプローブ30の検査面60に対する法線Pが水浸用アレイプローブ30についての垂直線Qとのなす角度）、R…最大偏向角度、H…高さ、L…ダミーエレメント群の設置長さ、l…送受信エレメント群の設置長さ、O…送受信エレメント群の中央、O'…右半分の送受信エレメント群の中央。

【書類名】 図面

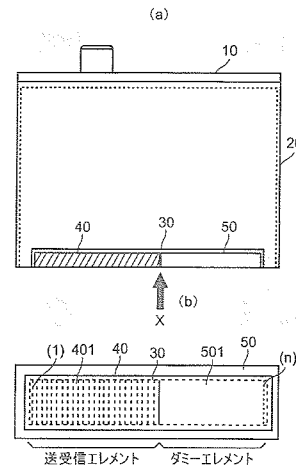
【図1】



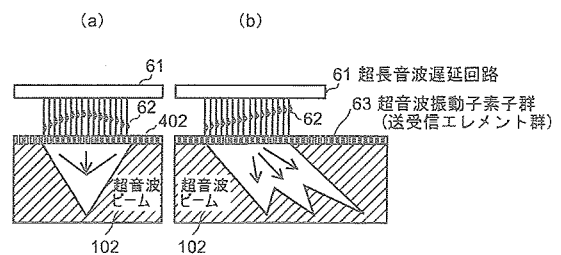
【図2】



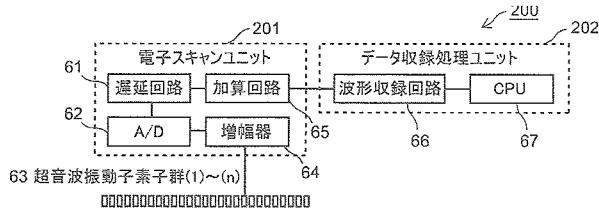
【図3】



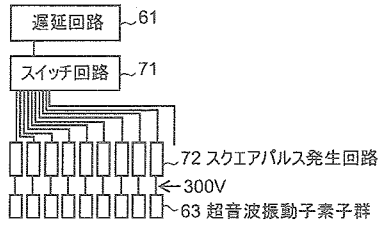
【図4】



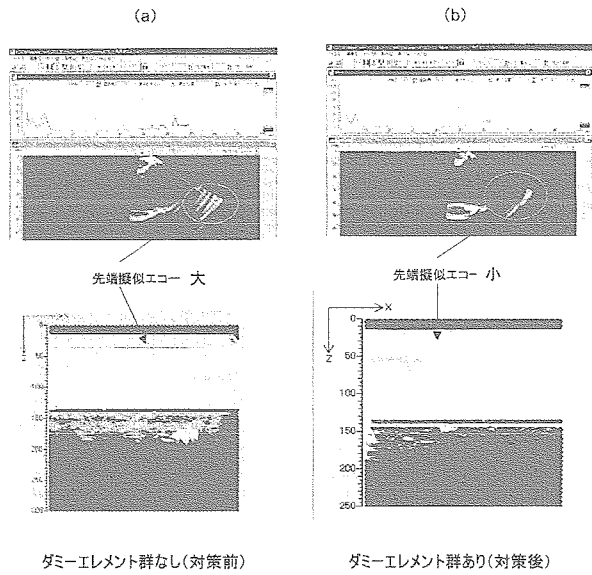
【図 5】



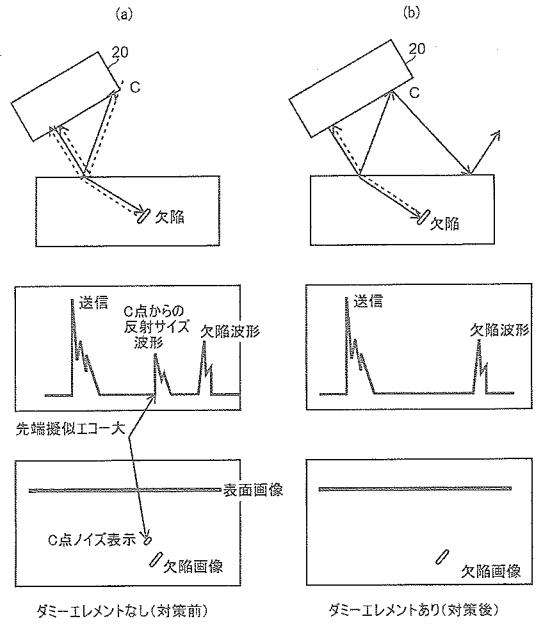
【図 6】



【図 7】



【図 8】



宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-05-006

---

発行 平成 18 年 3 月 10 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL:<http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株)フジプランズ

---

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

---

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写、転載、電子媒体に加工すること禁じます。

