

宇宙科学研究所報告

第126号

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

佐藤英一・三原 毅・志波光晴・佐藤明良
山添 智・島田善嗣・品川議夫・井田隆志

2003年9月

宇宙科学研究所

この報告書は宇宙科学研究所が、研究成果を公表するために発行する
不定期継続刊行物です。

本報告についてのお問い合わせは下記にご連絡下さい。

宇宙科学研究所 管理部庶務課法規・出版係

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

佐藤 英一*・三原 毅**・志波 光晴***・佐藤 明良****・山添 智****
島田善嗣****・品川 議夫*****・井田 隆志*****

Method for Automatic Ultrasonic Immersion

Inspection in All Directions of Graphite Ingot

By

Eiichi Sato*, Tsuyoshi Mihara**, Mitsuharu Shiwa***, Akiyoshi Sato****, Satoshi Yamazoe****,
Yoshitsugu Shimada****, Yoshio Shinagawa*****, Takashi Ida*****

* 宇宙科学研究所 Institute of Space and Astronautical Science

** 東北大学大学院工学研究科 Tohoku University, Faculty of Engineering

*** (財)発電設備技術検査協会 Japan Power Engineering and Inspection Co.

**** (株)IHI エアロスペース IHI Aerospace Co., Ltd.

***** (株)ジーネス GNES Co., Ltd

目次

序論	3
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	5
1. 適用範囲	
2. 引用規格	
3. 定義	
4. 技術者	
5. 超音波自動探傷装置の構成及び機能, 性能	
6. 超音波自動探傷試験の条件設定	
7. 超音波自動探傷試験の手順	
8. 超音波自動探傷試験	
9. 記録	
附属書1 (参考) グラファイト素材の水浸超音波自動探傷用対比試験片と測定方法	15
1. 対比試験片	
2. 垂直入射用測定方法	
3. 斜め入射用測定方法	
4. 探傷感度補正測定方法	
5. 全方位探傷確認方法	
附属書2 (参考) グラファイト素材の水浸超音波自動探傷用伝搬特性試験方法	20
1. 伝搬特性試験の概要	
2. 底面エコー監視試験方法	
3. 減衰補正測定方法	

序 文

宇宙科学研究所のM-Vロケットは、全段固体燃料の3段式ロケットであり、約1.8トンの衛星を250km軌道に投入することができる。1997年に1号機が電波天文衛星「はるか」を、1998年には3号機が火星探査機「のぞみ」を成功裏に打ち上げている。この3番機であるM-V-4号機は、X線天文衛星ASTRO-Eを搭載して2000年2月10日鹿児島宇宙空間観測所から打ち上げられた。初期の飛行は正常であったが、発射後55秒から姿勢が大きく乱れ、第一段燃焼終了時の速度が不足した。発射後75秒の第一段切り離し後の飛翔は正常に復したため、地上からの指令により不足した速度の回復に努めたが、残念ながらASTRO-E衛星を軌道に投入することはできなかった。

直ちに宇宙研に設置されたM-V-4号機調査特別委員会及び宇宙開発委員会技術評価部会が原因究明と対策案検討のための活動を開始し、宇宙研内外及び関係メーカーの専門家や関係者による検討が精力的に行われた。その結果、M-V-4号機の打ち上げ失敗は、発射後4秒までに第1段モータノズルのグラファイト製スロートインサートが破損脱落を始めたことがその原因とされた。このグラファイト製スロートインサートは

- ①重要部品に（インサートの破壊がミッション失敗に繋がる）
- ②脆性材料を（炭素系材料以外では3500°Cの燃焼ガスに耐えられない）
- ③高負荷で（無人ロケットの特徴）

使用している点に大きな特徴がある。したがって、本スロートインサートに対しては、破壊統計論に基づく設計と非破壊検査による保証が必要であったことが、強く指摘された [1]。

グラファイトは、多孔質で組織の不均一性が大きいことと信頼性の要求される部材に使用されることが少なかったため、後述する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 [2, 3] を除いては、ほとんど非破壊検査は実施されていないようである。一方、グラファイト製スロートインサートは、我が国のロケット開発の比較的初期から固体ロケットモータのほとんどに用いられ、小型モータを含めれば国内でも千機を越える実績を持つ。その実績からグラファイトの信頼性は極めて高いものと考えられてきたことと、詳細確実な非破壊検査が容易ではなかったことから、現在まで詳細な非破壊検査の実施は省略してきた。しかし本号機の不具合が発生した以上、スロートインサートの信頼性を保証し得る非破壊検査の実施なしにグラファイトをM-Vロケットに使用し続けるのは適当ではないと判断された。

今回の不具合を踏まえ、M-Vロケットの主モータにはグラファイトより遙かに強度及び破壊靱性が高い三次元カーボンカーボン複合材料（3D-C/C）をスロートインサートに使用することとし、新規設計及び確認試験を行ってきた。一方M-Vロケットのイグナイタ等の補助モータ及び観測ロケットS-310等には依然としてグラファイトを使用していくこととし、多軸破壊統計論の実部品設計への適用と、非破壊検査手法の開発と実施を行ってきた。その中で、設計において許容欠陥の寸法、位置、方向を評価し、それに対する品質保証としての超音波探傷が実施された。その結果、M-V-5号機が2003年5月9日に小惑星探査機「はやぶさ」の打ち上げに成功した。また、S-310観測ロケットは2002年2月6日に30号機、8月3日に31、32号機が相次いで打ち上げに成功した。

グラファイトの非破壊検査手法の開発は、宇宙科学研究所、航空宇宙技術研究所及び宇宙開発事業団の三機関

-
- [1] 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）。
 - [2] 豊田純二、伊与久達夫、石原正博、多喜川昇、塩沢周策、高温工学試験研究炉の黒鉛検査基準、JAERI-M 91-102、日本原子力研究所、（1991）。
 - [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）。

連携・協力事業による信頼性向上共同研究プロジェクトの中で、グラファイト非破壊検査検討会として実施された。その参加機関は、宇宙科学研究所、航空宇宙技術研究所、宇宙開発事業団、東京大学大学院工学系研究科、東京工業大学大学院理工学研究科及び応用セラミックス研究所、東北大学大学院工学研究科、三重大学工学部、(財)発電設備技術検査協会、(株)IHIエアロスペース、(株)ジーネス、日立エンジニアリング(株)である。

ノズルスロートに使用するIG-12グラファイトは、気孔率17%を有し超音波の減衰が大きく組織の不均一による散乱も大きいこと、試験体の厚さが大きいこと、検出すべきき裂の位置と方向を事前に特定できないこと等から、技術的に難しい探傷が必要とされた。反射法では原理的に超音波入射方向とき裂面法線が一致しなければき裂検出には有効ではない。したがって全方位に超音波を入射して検査を行う必要があるが、これは現状ではほとんど行われていない検査技術であった。前述の原研HTTRでは同種のIG-110グラファイトに対して、超音波探傷直接接触ギャップ法により厚さ600mmの試験体中の直径5mmの円板状欠陥が検出可能であるとしている[3]。しかしながら文献[2, 3]を見る限りにおいて、

- ①許容欠陥の寸法、位置、方向についての設計からの評価が明記されていないこと、
- ②設計応力に破壊統計論による体積依存性、多軸効果が明記されていないこと、
- ③入射面に対し垂直な欠陥しか対象としていない(全方位探傷となっていない)こと、

等、本部材に適用するには問題がある。

現在、宇宙科学研究所グラファイト非破壊検査検討会では、

- ①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の開発とその探傷能力の検証、
- ②連続可変入射角等が可能なアレイ型電子走査式システムを用いた探傷手法の開発、
- ③グラファイトの破壊源解明と非開口欠陥についての考慮、

等について検討を進めつつある。これは固体ロケットだけの技術ではなく、脆性材料の素材検査にも適用しうるものであると考えている。

本稿は、宇宙科学研究所、航空宇宙技術研究所及び宇宙開発事業団の三機関連携・協力事業によるグラファイト非破壊検査検討会の成果の中の「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」をまとめたものである。

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

Method for automatic ultrasonic immersion inspection in all directions
of graphite ingot

1. 適用範囲 本規格は、等方性グラファイト素材の加工前工程の素材検査における体積検査として適用される。その前提として、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と、許容欠陥寸法が次の検出対象欠陥以上であることが要求される。検出対象欠陥は、試験体内部に存在する全方位の ϕ 3mm以上の大きさを有する面状欠陥である。そのため、試験体を直径と高さの比が1程度の円柱形状とし、これを全没水浸させ、一探触子によるパルス反射法を用いた垂直及び斜め入射において自動探傷を行うための超音波検査方法である。全方位欠陥の検出のため、一つの入射面に対して通常の走査に加え入射角を2軸で走査する4軸の走査を行うことが特徴である。

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、その最新版を適用する。

JIS Z 2300 非破壊試験用語

JIS Z 2350 超音波探触子の性能測定方法

JIS Z 2352 超音波探傷装置の性能測定方法

JIS Z 3070 鋼溶接部の超音波自動探傷方法

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 3070によるほかは、次による。

3.1. 走査方法 探触子の移動方向及び間隔を設定する方法で、本規格では通常の走査に対応する面走査と、面走査の際の入射角を順次変更する入射角走査がある。それぞれ試験体上下面（平面）入射（図1a）及び試験体側面（曲面）入射（図1b）において以下の走査方式がある。

3.1.1. 面走査

a) R-X走査 試験体上下面（平面）入射に行う試験体回転-試験体径方向の走査

b) R-Z走査 試験体側面（曲面）入射に行う試験体回転-試験体高さ方向の走査

3.1.2. 入射角走査

a) i_1-i_2 走査 試験体上下面入射に行う上下角（探触子傾斜角） i_1 -水平角（探触子旋回角） i_2 の走査で、それぞれの走査点（データ収録点）ごとにR-X走査を行う。

b) i_1-o_{ff} 走査 試験体側面入射に行う上下角（ 90° -探触子傾斜角） i_1 -オフセット o_{ff} の走査で、それぞれの走査点（データ収録点）ごとにR-Z走査を行う。

c) 千鳥走査 入射角走査において、走査点数削減のため、走査点が互い違いの千鳥模様になるような走査方法（図1c）

3.2. オフセット距離 試験体側面入射においてビーム中心軸と試験体中心軸とのずれ（図1b）

3.3. 2軸首振り走査 基準感度設定のため平底穴のエコー高さを測定する際に、超音波ビームのグラファイト内での曲がりを見合わせるため、入射角を2軸で走査し、最大エコー高さを求める走査

3.4. 幾何学的屈折角 グラファイトの平均音速を用いて、入射角より6.3 b)式(1)を用いて計算した屈折角。

ただしここでの音速としては有効数字2桁の概略値を使用する。

4. 技術者 グラファイト素材の超音波探傷試験に従事する技術者は、探傷の原理及びグラファイト材料に関する知識、並びにその探傷についての十分な知識をもち、かつ、水浸型超音波自動探傷装置の使用に関する教育及び訓練を受けたものとする。

5. 超音波自動探傷装置の構成及び機能、性能

5.1. 装置の基本構成 使用する装置は、超音波探傷器、探触子、走査装置及び画像表示・収録装置で構成される。装置の構成を図2に示す。

5.2. 超音波探傷装置 超音波探傷器は、一般的な探傷器に要求される機能とともに、付加機能としてエコー収録ゲート機能及び距離振幅補正機能（DAC回路）を有するものを使用する。

5.2.1. エコー収録ゲート エコー収録ゲート内で最大エコーのビーム路程及びエコー高さを収録する。

5.2.2. 距離振幅補正 探傷を行うビーム路程内の6点以上のエコー高さよりDACカーブを作成する。DAC回路は30dB以上補正できる性能を有すること。

5.2.3. データ出力及びメモリー機能 超音波探傷器は、各走査条件において、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の出力をするとともに、Aスコープのメモリー機能を有する。

5.3. 探触子 探触子は、長いビーム路程間においてグラファイト材の組織雑音とφ3mm平底穴に対して高いS/Nを得ることを目的に、公称周波数が1～2MHzの広帯域非集束型の水浸型探触子を使用する。

5.4. 走査装置 走査装置は、円柱試験体内の全方位欠陥検出を対象とすることから、XYZの3軸に加え、試験体の回転及び探触子の傾斜及び旋回を行い、垂直入射及び斜め入射が可能な駆動機構及び水槽を用いる。

5.4.1. 走査装置に必要な機能 走査装置は、自動又は手動で次の事項の制御を行う。

- a) X軸 移動及び自動走査（ピッチ及び速度）
- b) Y軸 移動及び自動走査（ピッチ及び速度）
- c) Z軸 移動及び自動走査（ピッチ及び速度）
- d) 探触子傾斜角 i_1 移動
- e) 探触子旋回角 i_2 移動
- f) 試験体回転角 R 移動及び自動走査（ピッチ及び速度）

5.4.2. 走査装置に必要な性能 走査装置は、所定のデータ収録点において、データ収録速度以下で走査を行い、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 走査範囲は、X, Y軸は400mm以上、Z軸は300mm以上で、最小ピッチは0.5mm以下とする。
- b) 探触子傾斜角 走査範囲は $-90 \sim 90^\circ$ で、分解能は 0.1° 以下とする。
- c) 探触子旋回角 走査範囲は $0 \sim 360^\circ$ で、分解能は 0.1° 以下とする。
- d) 試験体回転角 走査範囲は $0 \sim 360^\circ$ で、最小ピッチは 0.2° 以下とする。

5.5. 画像表示・収録装置 画像表示では、円柱試験体の上下面及び側面に対するCスコープ表示機能を有し、エコー収録ゲート内の最大エコーにおけるエコー高さ及びビーム路程、並びに探触子入射点位置と入射角及び試験体回転角の収録機能を有するものを用いる。

5.5.1. 画像表示・収録装置に必要な機能

- a) 試験体上下面入射時のCスコープ表示
- b) 試験体側面入射時のCスコープ表示
- c) エコー収録ゲート内の最大エコーにおけるエコー高さ及びビーム路程の記録
- d) エコー収録ゲート内の最大エコーにおける探触子の入射位置 (X, Y, Z) 及び入射角 (i_1, i_2) 並びに試験体回転

角 (R) の記録

5.5.2. 画像表示・記録装置に必要な性能

- a) 表示する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。
- b) Cスコープの各座標軸は、3mm以下の分解能で反射源の位置を評価し、表示する。
- c) 表示されるすべての反射源は、収録したエコーの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。
- d) 収録されたデータは保存媒体に記録する。

6. 超音波自動探傷試験の条件設定

6.1. 試験片

6.1.1. 試験片の表面処理 試験片は機械加工で▽▽仕上げを行った後、十分乾燥させる。防水処理としてエポキシ樹脂コーティング材を表面に塗装し、乾燥処理を行う。

6.1.2. 標準試験片 本探傷試験においては、標準試験片を用いて行われる校正は、指定の対比試験片を用いて行う。

6.1.3. 対比試験片 以下の測定項目を満たす対比試験片を準備する。なお、試験片の寸法・形状、測定方法は付属書1を参照のこと。

- a) 垂直入射及び斜め入射時の距離振幅補正 6.5及び付属書1の2.2及び3.2参照
- b) 垂直入射及び斜め入射時のビーム幅 6.6及び付属書1の2.3及び3.3参照
- c) 基準感度調整 8.1 a) 参照
- d) 探傷感度補正 6.9参照

6.2. 水距離 試験体と探触子の水距離は、試験体内の探傷領域内において距離振幅曲線に乱れない条件において、S2表面エコー(2回目の表面エコー)がB1底面エコーのビーム路程外になるように設定する。

6.3. 斜め入射設定

a) 入射点 探触子の幾何学的中心軸の延長を入射点とする。

b) 屈折角 試験体上下面入射時のグラファイト内の屈折角 θ_g は、水の音速を v_w 、3.4で定めたグラファイトの平均音速を v_g とし、水中からの入射角を θ_i とすれば、以下の関係で求められる。

$$\sin\theta_g = \frac{v_g}{v_w} \sin\theta_i \quad (1)$$

試験体側面入射時の屈折角は、オフセット距離 P_o と試験体の直径 d より、式(1)と以下の関係で求められる。

$$P_o = \frac{d}{2} \sin\theta_i \quad (2)$$

6.4. 範囲探傷部位の全方位探傷に必要な走査及び監視範囲 基本的には、各探傷面から45°までの傾き欠陥を探傷するが、試験体角による未探傷域をなくすため、各試験面からの傾き約70°までの傾き欠陥を探傷する。それに必要な走査範囲は以下のとおりである。

6.4.1. 試験体上下面入射

- a) R軸走査範囲 0 - 360°
- b) X軸走査範囲 試験体中心 - 試験体側面 (走査距離: 試験体半径)
- c) i_1 軸走査範囲 幾何学的屈折角が0 - 72°
- d) i_2 軸走査範囲 0 - 360°

6.4.2. 試験体側面入射

- a) R軸走査範囲 0 - 360°

b) Z軸走査範囲 試験体上面－試験体下面（走査距離：試験体長さ）

c) i_1 軸走査範囲 幾何学的屈折角が0－45°

d) θ_{ff} 軸走査範囲 幾何学的屈折角が0－68°

6.4.3. 監視範囲の設定及び必要走査範囲の確認 屈折角10, 20, 30, 45°における傾き傷に対する探傷範囲をビーム中心軸を基に作図し、それをもとに、各走査条件における監視範囲を設定する。同時に本作図にて、未探傷領域がすべての条件において7.1.1で定める試験体の外周幅5mm及び端部12mm角に収まることを確認する。さらに、附属書1の5に基づき全方位探傷確認を行う。

6.5. 距離振幅の補正方法 附属書1の2.2及び3.2に基づき、以下の条件において、DAC回路を用いて電子的に距離振幅の補正を行う。なお、補正方法は各探傷及び入射条件（ビーム路程・入射角・入射面）ごとに行ってもよいし、すべての条件における最低の条件を基準として行ってもよい。

a) 垂直入射 試験体上下面及び側面入射における所定のビーム路程

b) 斜め入射 試験体上下面及び側面入射のそれぞれの屈折角における所定のビーム路程

6.6. ビーム幅の測定 附属書1に示す対比試験片を用い、試験体上下面及び側面入射時の必要ビーム路程内におけるビームプロファイルを測定し、-1dB及び-3dBの最小ビーム幅を求める。ここで最小ビーム幅は、試験体上下面入射及び側面入射のそれぞれに対し、面走査（ビーム幅）及び入射角走査（ビーム拡がり角）について求める。

6.7. 面走査におけるデータ収録点間隔の選定 入射面によりデータ収録点間隔走査方法を選定する。

6.7.1. 試験体上下面入射 6.6で測定された-1dB及び-3dBビーム幅を基準として、未探傷領域がないよう走査条件を設定する。ここでR走査は入射点間隔がビーム幅の1/5以下になる角度ピッチで行い、X走査はビーム幅以下の探傷ピッチで行う。図1aにR-X走査の模式図を示す。

6.7.2. 試験体側面入射 6.6で測定された-1dB及び-3dBビーム幅を基準として、未探傷領域がないよう走査条件を設定する。ここでR走査は入射点間隔がビーム幅の1/5以下になる角度ピッチで行い、Z走査はビーム幅以下の探傷ピッチで行う。図1bにR-Z走査の模式図を示す。

6.8. 入射角走査におけるデータ収録点間隔の選定 入射面によりデータ収録点間隔走査方法を選定する。

6.8.1. 試験体上下面入射 図1cに示すように、6.6で測定された-1dB及び-3dBビーム幅を基準として、千鳥走査を用いて、6.4.3を基に未探傷領域がないよう走査条件を設定する。ここで入射角 i_1 走査は屈折角がビーム拡がり角以下になる探傷ピッチで行う。入射角 i_2 走査は、 i_1 が90°付近においては、屈折角で表示したデータ収録点が正六角格子を描くよう設定する。 i_1 が小さくなるにつれ、 i_2 の探傷ピッチは大きくしてよいが、探傷条件の単純化のために、ピッチは整数倍で変更することが望ましい。なお、この千鳥走査で未探傷領域をなくすためにはビーム拡がり角が基準ビーム拡がり角の $2/\sqrt{3} = 1.15$ 倍必要となるので、ビーム端における強度低下を6.9.4でビーム端補正として導入する。

6.8.2. 試験体側面入射 図1cに示すように、6.6で測定された-1dB及び-3dBビーム幅を基準として、千鳥走査を用いて、6.4.3を基に未探傷領域がないよう走査条件を設定する。ここで入射角 i_1 走査は屈折角がビーム拡がり角以下になる探傷ピッチで行う。オフセット走査は、 i_1 が90°付近においては、屈折角で表示したデータ収録点が正六角格子を描くよう設定する。 i_1 が小さくなるにつれ、オフセットの探傷ピッチは大きくしてよいが、探傷条件の単純化のために、ピッチは整数倍で変更することが望ましい。なお、この千鳥走査で未探傷領域をなくすためにはビーム拡がり角が基準ビーム拡がり角の $2/\sqrt{3} = 1.15$ 倍必要となるので、ビーム端における強度低下を6.9.4でビーム端補正として導入する。

6.9. 探傷感度補正量の評価 探傷感度 G_R は、8.1 a) で求める $\phi 3$ 平底穴の80%エコー高さ G_T^{\max} を基準感度とし、これに付加すべき以下の補正項を測定し、付加することで求める。

6.9.1. 入射面補正 ΔG_p 附属書1の4に基づき、垂直入射における入射面の影響による補正量を、平面を基準

として曲面のときに ΔG_p として求める。

6.9.2. 入射角補正 ΔG_θ 附属書1の4に基づき、入射角ごとの補正量を ΔG_p として求める

6.9.3. 減衰補正 $2\alpha W_{\max}$ 附属書2の3に基づき、減衰補正率 α を求め、各入射条件における監視範囲の最大ビーム路程 W_{\max} による補正量を $2\alpha W_{\max}$ として求め、これを監視範囲全体に適用する。

6.9.4. ビーム端補正 ΔG_S 6.8で定めた千鳥走査によるときのビーム端における強度の低下量を、6.6で測定したビームプロファイルに基づき評価し、 ΔG_S として求める。

6.9.5. コーナー入射補正 ΔG_c 附属書1の4に基づき、垂直及び斜め入射におけるコーナー（試験体角部）入射の影響による補正量を ΔG_c として求める。

7. 超音波自動探傷試験の手順

7.1. 試験体

7.1.1. 探傷領域 探傷部位は、図4に示す直径と高さの比が1に近い円柱状試験体の中で、不感帯に基づく未探傷領域として設定した、各探傷面の深さ5mmまでの外周部及び上下側面端部の12mm角を除く全体積である。この未探傷領域は製品には使用しない。

7.1.2. 表面処理 試験体は機械加工で▽▽仕上げを行った後、十分乾燥させる。防水処理としてエポキシ樹脂コーティング材を表面に塗装し、乾燥処理を行う。

7.2. 探傷の時期及び内容 探傷は試験体伝播特性試験と超音波自動探傷試験に分かれ、前者は底面エコー監視試験と基準感度設定試験とに分けられる。探傷の実施時期は一試験体において以下の3回となる（図3）。

7.2.1. 底面エコー監視試験 伝播特性試験の最初に行う試験で、見かけの減衰が小さな部位と大きな部位を選択し、基準反射源となる平底穴加工位置を特定するため行う試験（附属書2参照）。このとき、複数の底面エコーの伝搬時間より本試験体の音速の平均値を求める。

7.2.2. 減衰補正測定試験 超音波伝播特性試験において平底穴加工後に行う試験で、基準感度を補正するために底面エコー監視試験後に加工された平底穴のエコー高さを測定する試験（附属書2）。このとき、複数の位置に加工された平底穴それぞれに2軸首振り走査を行い最大エコー高さを測定し、その最大エコー高さの中の最小値を基準とし、その伝搬距離より減衰補正率 α を求める。

7.2.3. 超音波自動探傷試験 基準感度設定試験後に、加工された平底穴加工面を切削加工で除去し探傷を行う試験。粗探傷と精密探傷の2段階からなる。粗探傷は-3dBのビーム幅に相当する走査ピッチで行い、精密探傷すべき部位を特定する。精密探傷は粗探傷で特定された部位に対し-1dBビーム幅に相当する走査ピッチで行い、試験体の合否判定を行う。

8. 超音波自動探傷試験

8.1. 試験準備 作業日ごとに下記a-d)を設定する。

a) 基準感度調整 附属書1に示す対比試験片に含まれる最大ビーム路程の $\phi 3$ 平底穴を用いて、2軸首振り走査による最大エコー高さ G_r^{\max} が80%となるように探傷器の基準感度を設定する。その後面走査を行う。結果のAスコープ及びCスコープ表示を記録すること。

b) 試験体の軸合わせ 試験体側面の表面エコーを用いて試験体回転軸位置の調整を行う。

c) ビーム軸合わせ 試験体各探傷面の表面エコーを用いてビーム軸合わせ及び入射点の設定を行う。

d) 水距離設定 試験体各探傷面の表面エコーを用いて水距離の設定を行う。

8.2. 粗探傷 粗探傷は、6.6で求めた-3dBビーム幅を基準として探傷を行う。

a) データ収録点間隔の調整 入射面、入射角、回転角、オフセット位置ごとに設定する。

b) エコー収録ゲートの調整 入射面、入射角、回転角、オフセット位置ごとに設定する。

c) 探傷感度の調整 探傷感度 G_R は、8.1 a) で求めた $\phi 3$ 平底穴の 80% エコー高さ G_T^{\max} を基準感度とし、6.9 で評価した入射面補正 ΔG_P 、入射角補正 ΔG_θ 、減衰補正 $2\alpha W_{\max}$ 、ビーム端補正 ΔG_S 、コーナー入射補正 ΔG_C を用いて、以下の式を用いて求める。

$$G_R = G_T^{\max} + \Delta G_P + \Delta G_\theta + 2\alpha W_{\max} + \Delta G_S + \Delta G_C \quad (3)$$

各入射条件ごとの探傷感度を、上記の補正式を用いてあらかじめ求めておかなければならない。ただし、ビーム端補正 ΔG_S 及びコーナー入射補正 ΔG_C については、探傷感度の補正相当量を d) の判定基準のエコー高さを変えることで置き換えてもよい。

d) 精密探傷実施判定基準 c) の補正を加えた上で、 $\phi 3$ 平底穴に相当する 80% 以上のエコーを示す反射源に対しては、8.11 の精密探傷を実施する。

8.3. 精密探傷 粗探傷において精密探傷箇所が認められた場合には、その箇所について精密探傷を実施する。精密探傷は、6.6 で求めた -1dB ビーム幅を基準として探傷を行う。

a) データ収録点間隔の調整 入射面、入射角、回転角、オフセット位置ごとに設定する。

b) エコー収録ゲートの調整 入射面、入射角、回転角、オフセット位置ごとに設定する。

c) 探傷感度の調整 探傷感度 G_R は、8.1a) で求めた $\phi 3$ 平底穴の 80% エコー高さ G_T^{\max} を基本とし、6.9 で評価した入射面補正 ΔG_P 、入射角補正 ΔG_θ 、減衰補正 $2\alpha W_{\max}$ 、ビーム端補正 ΔG_S 、コーナー入射補正 ΔG_C を用いて、式 (3) を用いて求める。各入射条件ごとの探傷感度を、上記の補正式を用いてあらかじめ求めておかなければならない。ただし、ビーム端補正 ΔG_S 及びコーナー入射補正 ΔG_C については、探傷感度の補正相当量を 8.4 の判定基準のエコー高さを変えることで置き換えてもよい。なお粗探傷と精密探傷ではビーム端補正 ΔG_S の大きさのみが異なる。

8.4. 合否判定基準 8.3 c) の補正を加えた上で、 $\phi 3$ 平底穴に相当する 80% 以上のエコーを示す反射源が存在する場合には、検出対象欠陥を含有するものとして、その試験体は不合格とする。

9. 記録 以下の項目を記録する。

9.1. 試験成績書

- a) 試験年月日
- b) 技術者
- c) 試験体識別番号
- d) 試験体材質及び寸法
- e) 超音波自動探傷器型番
- f) 探触子型番
- g) 合否判定結果

9.2. 走査方法及びエコー収録ゲート 各入射条件における下記事項を一覧表の形で記録する。

- a) 探傷面
- b) 入射角 i_1
- c) 入射角 i_2 (上下面入射時) あるいはオフセット o_{ff} (側面入射時)
- d) エコー収録ゲート

9.3. 探傷条件

- a) 対比試験片識別番号あるいは形状
- b) 対比試験片の A スコープ及び C スコープ表示
- c) 試験体の平均音速

d) 各入射面における距離振幅補正データ

e) 感度補正量

9.4. 探傷データ 精密探傷を行った反射源について、以下の内容を記録する

a) 探傷面

b) 入射角 i_1

c) 入射角 i_2 (上下面入射時) あるいはオフセット o_{ff} (側面入射時)

d) 入射点位置

e) ビーム路程

f) エコー高さ

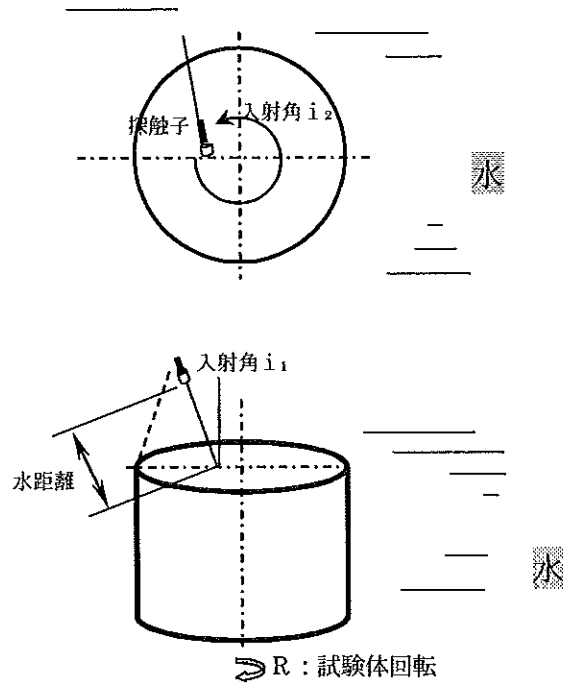


図1a R-X走査の模式図

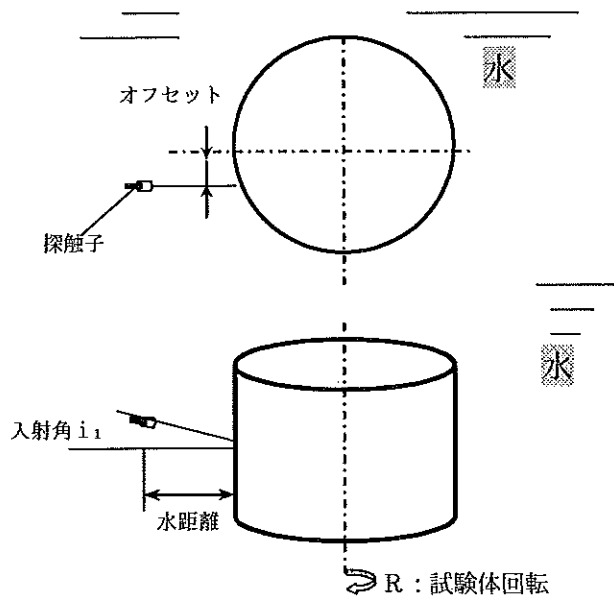


図1b R-Z走査の模式図

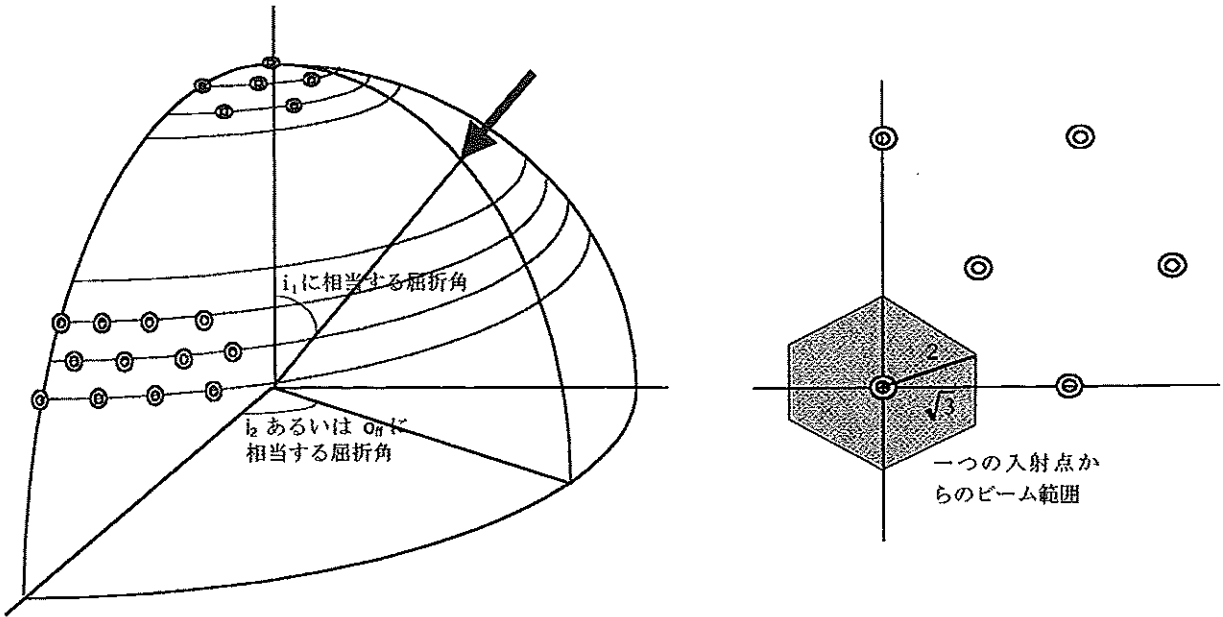


図1c 入射角走査の模式図

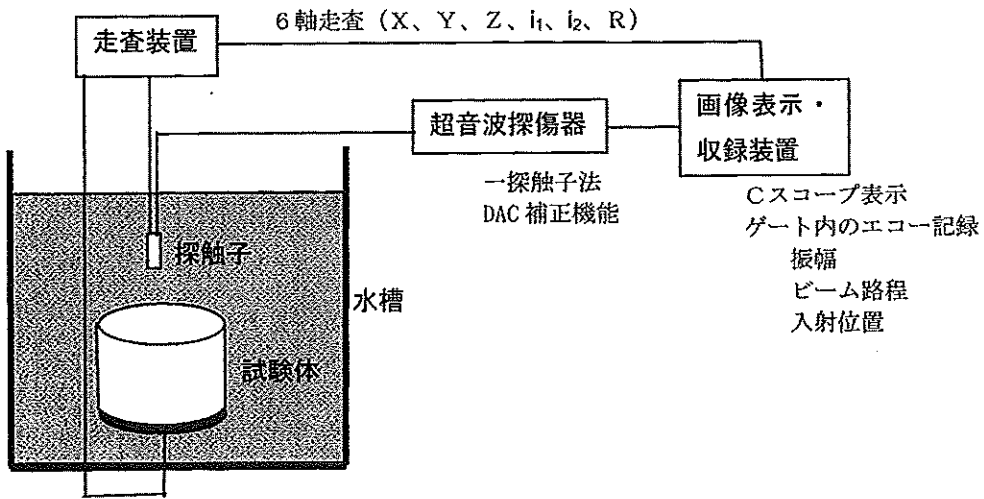


図2 超音波自動探傷装置の構成

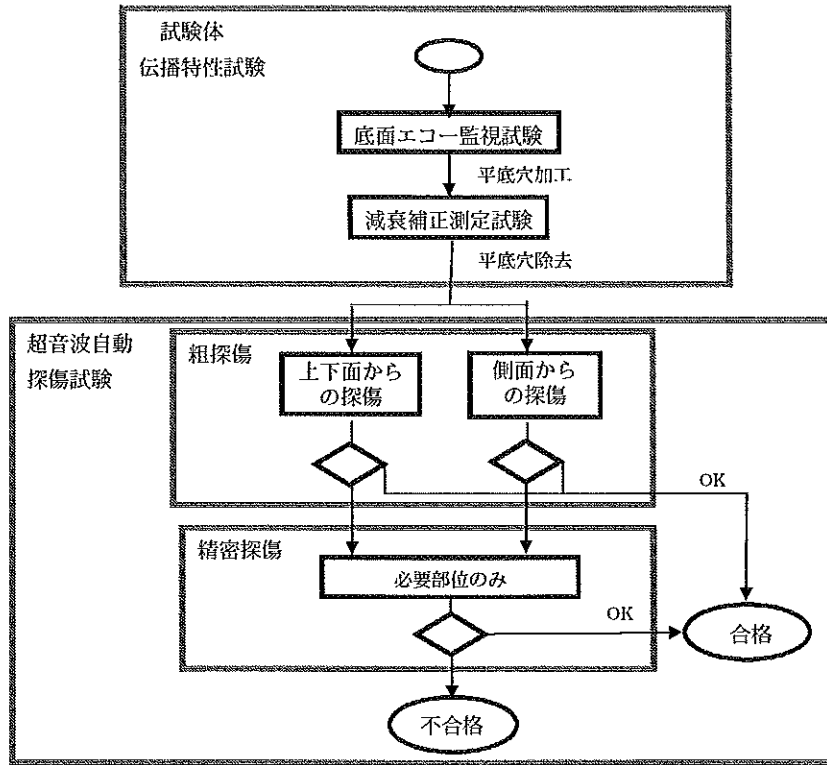


図3 探傷実施フロー

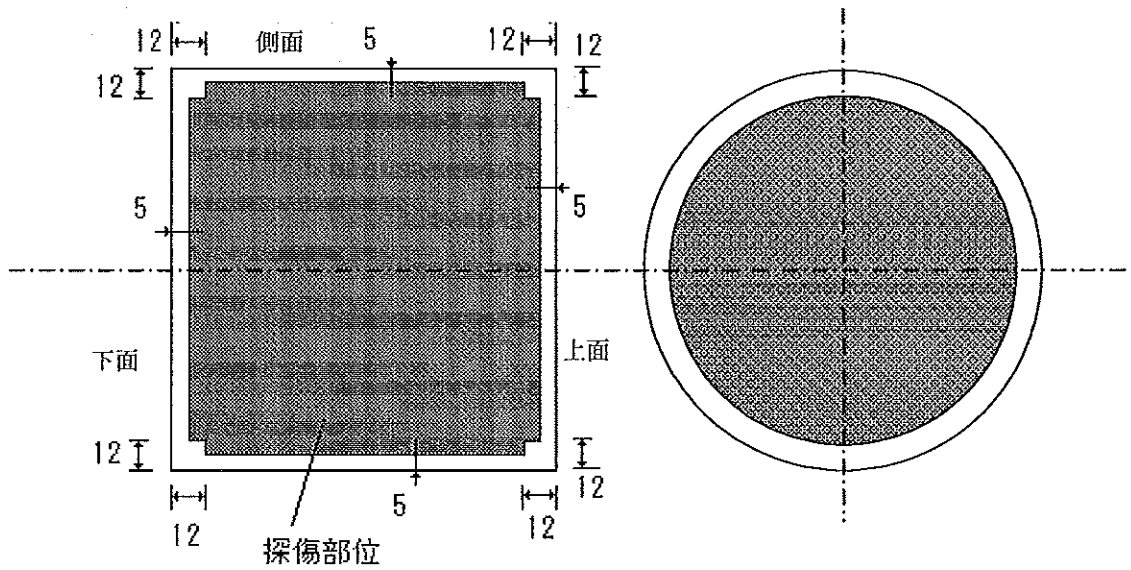


図4 探傷領域及び未探傷領域

附属書1 (参考) グラファイト素材の水浸型超音波自動探傷用 対比試験片と測定方法

この附属書(参考)は、直径225mm、長さ220mmの試験体の探傷に必要な対比試験片と測定方法を示したもので、本体に関連する事柄を補足するもので、規定の一部ではない。

1. 対比試験片

- a) **F型試験片** 平面入射における垂直入射時の距離振幅補正、基準感度設定及びビーム幅・角度測定用。形状・寸法を附図1-1に、各試験片の反射源と幾何学的に計算したビーム路程を附表1-1に示す。
- b) **G型試験片** 曲面入射における垂直入射時の距離振幅補正、入射条件感度補正量及びビーム幅・拡がり角測定用。形状・寸法を附図1-2に、各試験片の反射源と幾何学的に計算したビーム路程を附表1-2に示す。
- c) **H型試験片** 曲面入射における斜め入射時の距離振幅補正、斜め入射条件設定、全方位探傷確認及び走査精度確認用。形状・寸法を附図1-3に、各試験片の反射源と幾何学的に計算したビーム路程を附表1-3に示す。
- d) **L型試験片** 垂直及び斜め入射におけるコーナー(試験体角部)入射の影響による補正量測定用。形状・寸法を附図1-4に、反射源と幾何学的に計算したビーム路程を附表1-4に示す。

附表1-1 F型試験片の反射源とビーム路程

対比試験片名	反射源 (mm)	ビーム路程 (mm)
F 2-3	φ3平底穴	10
F 2-2		30
F 2-1		60
F 1-3		105
F 1-2		155
F 1-1		215

附表1-2 G型試験片の反射源とビーム路程

対比試験片名	反射源 (mm)	ビーム路程 (mm)
G 1	φ3平底穴	10
		30
		60
G 2		105
		155
		215

附表1-3 H型試験片の反射源と外周からの距離

対比試験片名	反射源 (mm)	外周からの 距離 (mm)
H 1	φ2. L40 横穴	2.5
		7.5
		72.5
		112.5
H 2		12.5
		22.5
		37.5
		215

附表1-4 L型試験片の反射源とビーム路程

対比試験片名	反射源 (mm)	ビーム路程 (mm)
L 1	φ3平底穴 (45°傾き)	93
		107

2. 垂直入射用測定方法

2.1. 入射点 探触子の幾何学的中心軸の延長を入射点とする。

2.2. 距離振幅補正方法 試験体上下面入射条件ではF型試験片、側面入射条件ではG型試験片を用い、2軸首振

り走査を行い ϕ 3mm 平底穴の最大エコー高さが基準エコー高さと同じになるようにゲインを調整し、距離振幅補正を行う。

2.3. ビーム幅測定方法 F型試験片の各ビーム路程の試験片において、2軸首振り走査を行い ϕ 3mm 平底穴の最大エコー高さが得られた位置を基準として左右走査を行い、 -3dB 及び -1dB の移動距離を求め、最小移動距離を面方向ビーム幅とする。角度方向ビーム幅（ビーム拡がり角）については、F型試験片の入射角 i_1 を変化させて面走査を行い、 ϕ 3mm 平底穴の最大エコー高さのプロファイルを作成し、 -3dB 及び -1dB の最小幅を角度方向ビーム幅とした。

3. 斜め入射用測定方法

3.1. 入射点 探触子の幾何学的中心軸の延長を入射点とする。

3.2. 距離振幅特性測定方法 H型試験片において幾何学的に求めた各屈折角条件における横穴の最大エコーを求める。さらに、その位置でZ方向に走査を行い最大エコー高さを求める。各反射源のエコー高さとビーム路程より、距離振幅特性を求める。

3.3. ビーム幅測定方法 垂直入射で得られた面方向ビーム幅を斜め入射の変化させて面方向ビーム幅とする。またG1試験片を用い、 O_{H} を変化させて面走査を行い、 ϕ 3mm 平底穴の最大エコー高さのプロファイルを作成し、 -3dB 及び -1dB の最小幅を角度方向ビーム幅とした。

4. 探傷感度補正測定方法

4.1. 入射面補正 F型及びG型試験片を用いて垂直入射における平面及び曲面の感度差を測定し、入射面感度差 ΔG_p として求める。

4.2. 入射角補正 H型試験片側面入射を用いて、入射角が異なる場合の距離振幅特性を求め、 0° 入射と比較し、入射角毎の補正量を ΔG_θ として求める。

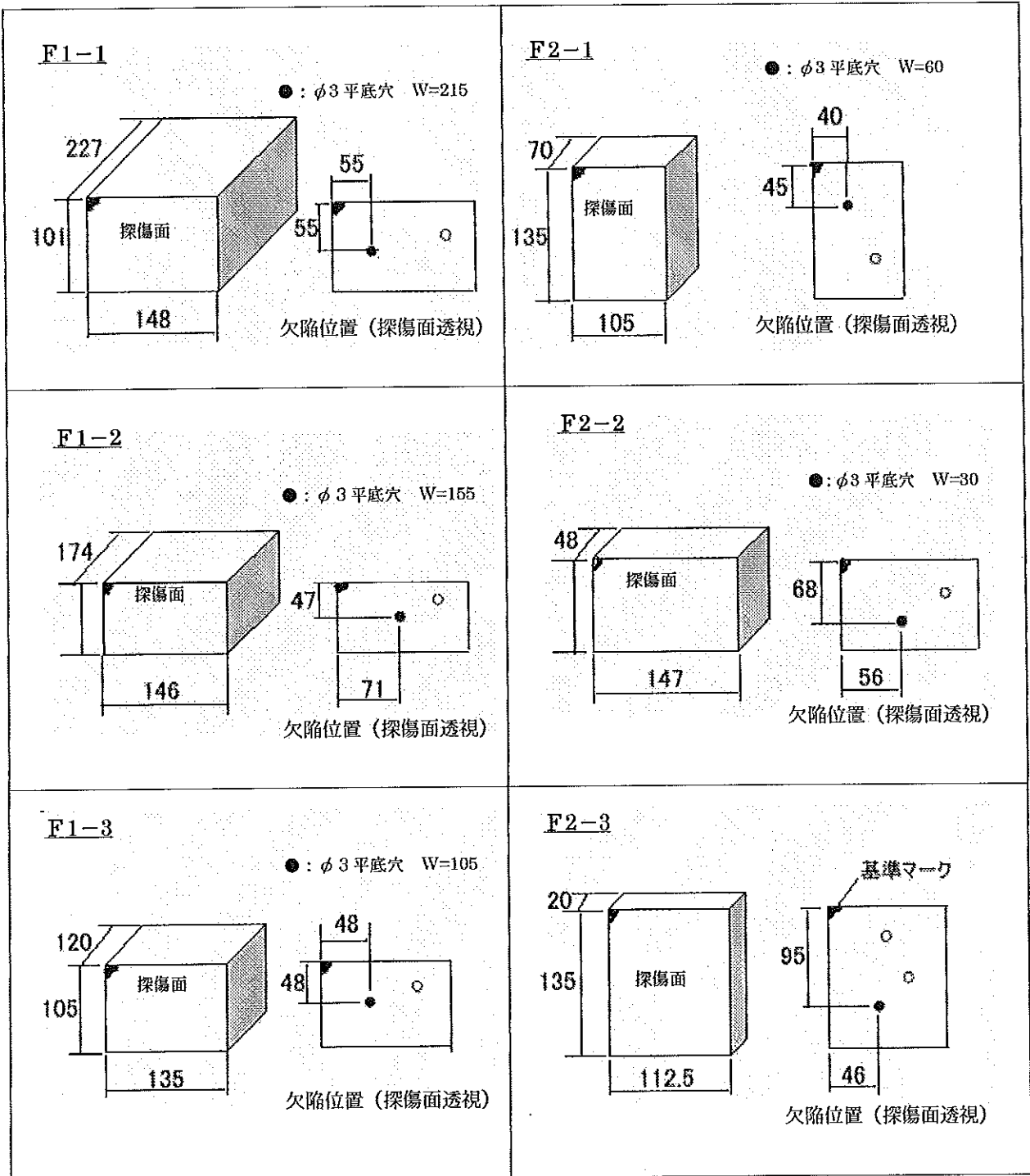
4.3. コーナー入射補正 L型試験片を用い、垂直及び斜め入射におけるコーナー入射時と探傷面内部入射時の感度差を測定し、コーナー入射感度差 ΔG_c として求める。

5. 全方位探傷確認方法

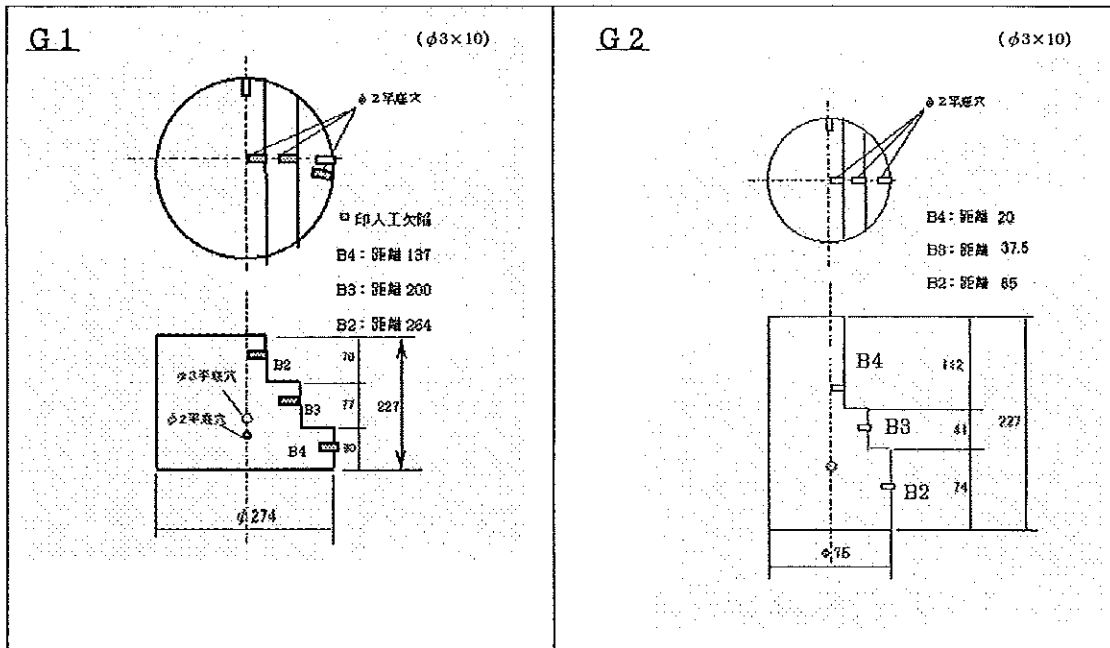
5.1. 屈折角 H型試験片側面入射を用いて、不感帯との境界位置にある反射源の検出を確認しそのときの最大及び最小屈折角を求め、設定条件を満たしているか確認する。

5.2. ビーム路程 H型試験片側面入射を用いて、不感帯との境界位置にある反射源の検出を確認しそのときの最大及び最小ビーム路程を求め、設定条件を満たしているか確認する。

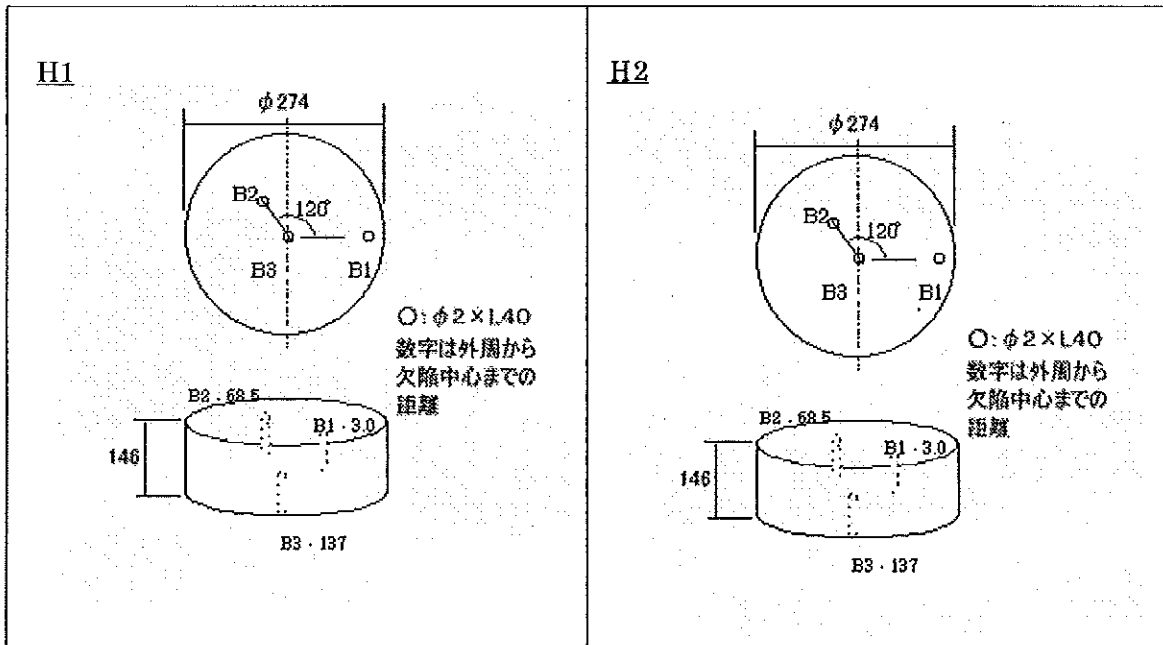
5.3. 不感帯 H型試験片側面入射を用いて、不感帯との境界位置にある反射源の検出を確認する。



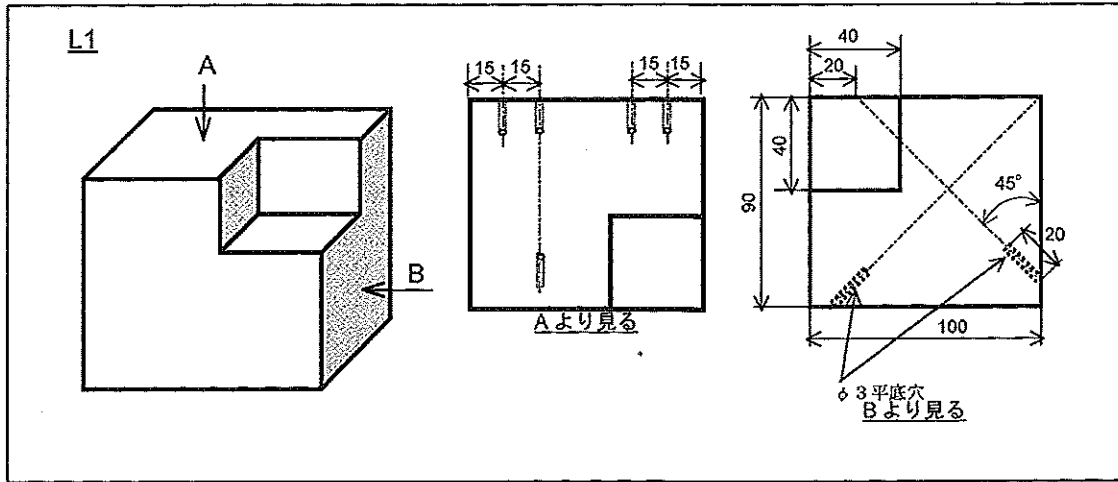
附図 1-1 F型試験片の形状・寸法 (寸法は参考値, 単位 mm)



附図 1-2 G 型試験片の形状・寸法 (寸法は参考値, 単位 mm)



附図 1-2 H 型試験片の形状・寸法 (寸法は参考値, 単位 mm)



附図 1-3 L型試験片の形状・寸法 (寸法は参考値, 単位 mm)

附属書2（参考） グラファイト素材の水浸型超音波自動探傷用

伝搬特性試験方法

この附属書（参考）は、直径225mm、長さ220mmの試験体に対する伝搬特性測定方法を示したもので、本体に関連する事柄を補足するもので、規定の一部ではない。

1. 伝搬特性試験の概要

1.1. 伝搬特性試験の目的 グラファイト材は伝搬特性のばらつきが大きいので、試験体ごとに音速・減衰特性を測定し、対比試験片で得られた基準感度の補正を行う。

1.2. 伝搬特性試験の実施時期 超音波自動探傷試験の前に実施する。

1.3. 伝搬特性試験の内容

a) 底面エコー監視試験 伝搬特性試験の最初に行う試験で、複数の底面エコーの伝搬時間より本試験体の音速の平均値を求める。また、上下面からの測定において、見かけの減衰が小さな部位と大きな部位を選別し、基準反射源となる平底穴加工位置を特定する。

b) 減衰補正測定試験 超音波伝播特性試験において平底穴加工後に行う試験で、基準感度を補正するために底面エコー監視試験後に加工された平底穴のエコー高さを2軸首振り走査により測定する試験。このとき、複数の位置に加工された平底穴の最大エコー高さを2軸首振り走査を行うことで測定し、その最大エコー高さの最小値を基準とし、その伝搬距離より減衰補正率 α を求める。

2. 底面エコー監視試験方法

2.1. 試験体 試験体は円柱形状で、寸法は直径225mm、長さ235mmとする。

2.2. 超音波探傷装置 測定に用いる探触子及び探触子の水距離、探傷器、走査装置は、探傷試験に用いるものと同じもので同じ条件を用いる。

2.3. 底面エコー監視測定方法

a) 走査方法 上下面はY-Z走査、側面はR-2走査で行なう。

b) 走査ピッチ Y方向0.5mm、Z方向0.5mm、R方向 0.2° ピッチとする。

c) 測定感度 最大底面エコー高さが100%となる感度で測定を行う。

2.4. 底面エコー監視表示方法及び記録

底面エコー高さのCスコープ像。

2.5. 音速分布測定方法 附図2-3、2-4に示す端面（16点）及び側面（20点）の位置において、表面エコーと底面エコーの伝搬時間差を $1\mu\text{s}$ 分解能で測定し、試験体長さ235mm（伝搬距離）より音速を求める。

2.6. 音速分布記録 各位置における音速、計36点を基に、本試験体の平均音速を求める。

3. 減衰補正測定方法

3.1. 試験体 試験体は円柱形状で、寸法は直径225mm、長さ235mmとする。試験体の底端部には、上下面からの底面エコー監視試験で得られた底面エコー高さのCスコープ像より、エコー高さの最大位置1カ所、エコー高さの最低位置1カ所、エコー高さの低い位置を1カ所以上に $\phi 3\text{mm}$ 、長さ10mmの平底穴を加工する。

3.2. 超音波探傷装置 測定に用いる探触子及び探触子の水距離、探傷器、走査装置は、探傷試験に用いるものと同じもので同じ条件を用いる。

3.3. 測定方法 各反射源の最大エコー高さを2軸首振り走査により求める。

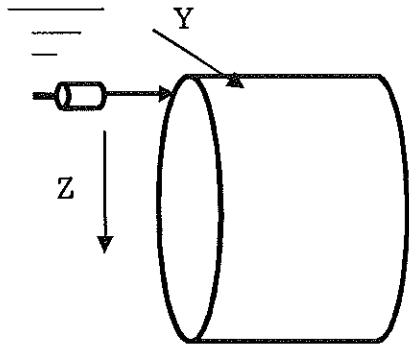
3.4. 記録 各位置における、最大エコー高さ及びビーム路程。

3.5. 減衰補正率 α 減衰補正率は、探傷感度の調整を行うときに、監視範囲の最大ビーム路程による補正量を求めるときに用いる。減衰補正率 α は、 L を試験体長さとし以下の式より求める。

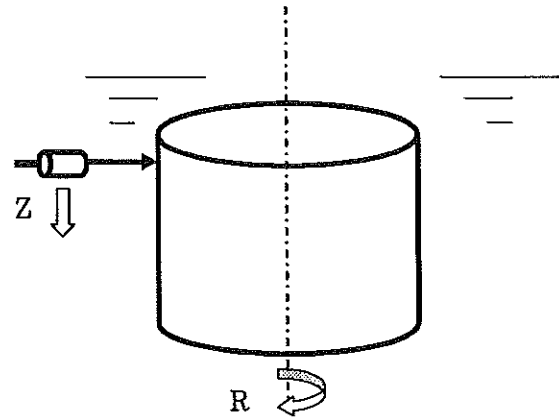
$$\alpha = \Delta G / 2L \quad (\text{dB} / \text{mm}) \quad (1)$$

$$\Delta G = -(G_F^{\max} - G_T^{\min}) \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

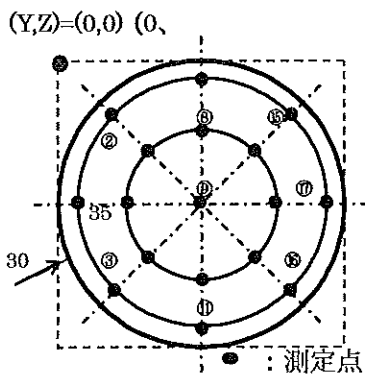
ただし、 G_F^{\max} は対比試験片（F1-1：伝搬距離215mm）の ϕ 3mm平底穴の最大エコー高さが80%時の探傷器最小ゲインであり、 G_T^{\min} は試験体の ϕ 3mm平底穴（伝搬距離225mm）の最大エコー高さが80%時の探傷器最大ゲインである。



附図 2-1 上下面からの測定 (Y-Z 走査)



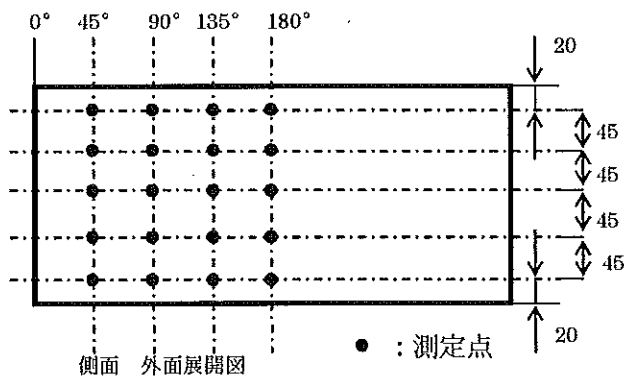
附図 2-2 側面からの測定 (R-Z 走査)



● : (Y、Z) 座標

- | | |
|-----------------|---------------|
| ① (30、112.5) | ② (54、54) |
| ③ (54、171) | ④ (65、112.5) |
| ⑤ (79、79) | ⑥ (79、146) |
| ⑦ (112.5、30) | ⑧ (112.5、65) |
| ⑨ (112.5、112.5) | ⑩ (112.5、160) |
| ⑪ (112.5、195) | ⑫ (146、79) |
| ⑬ (146、146) | ⑭ (160、112.5) |
| ⑮ (171、54) | ⑯ (171、171) |
| ⑰ (195、112.5) | |

附図 2-3 上下面測定位置 (定点)



附図 2-4 側面測定位置 (定点)

既 刊 行 物

- 第 105 号 (1999 年 10 月) S-310-27 号機による中層大気水蒸気密度の測定
第 106 号 (1999 年 12 月) S-310-27 号機による DC プローブ測定
— E S 層中の電子温度について—
第 107 号 (2000 年 2 月) SEPAC プロジェクトのエンジニアリングとマネジメント
第 108 号 (2000 年 2 月) 飛行時間法を用いた中性ガス質量分析器の開発
第 109 号 (2000 年 3 月) 金星ホールの生成機構に関する一考察
第 110 号 (2000 年 8 月) 臼田宇宙空間観測所水素メーザ標準周波数時刻システム
第 111 号 (2000 年 10 月) 臼田宇宙空間観測所用 X バンド冷却低雑音増幅器
第 112 号 (2000 年 10 月) 探査機異常監視・診断システム (ISACS-DOC)
第 113 号 (2000 年 12 月) 宇宙用熱制御材料の太陽光吸収率の入射角依存性と全
半球放射率の温度依存性に関する測定データ
第 114 号 (2001 年 3 月) 科学衛星「はるか」の位相基準信号伝送システム
— 臼田地上局システムを中心にして—
第 115 号 (2001 年 3 月) 成層圏大気中の多種の微量成分観測を目的とした気球
搭載用大気採取装置の研究
第 116 号 (2001 年 9 月) 科学衛星「はるか」における位相基準信号伝送のため
の衛星搭載システム
第 117 号 (2001 年 10 月) 電磁飛翔体加速装置開発の歩み—(I)—
第 118 号 (2001 年 12 月) リングコア磁力計センサの衝撃実験
— ペネトレータ型磁力計開発の基礎実験—
第 119 号 (2002 年 8 月) 窒素振動温度測定器の室内実験による較正と解析方法
の改良
第 120 号 (2002 年 11 月) Bepi Colombo / MMO 搭載カメラ用光学ガラスの放射
線耐性試験
第 121 号 (2003 年 3 月) X 線天文観測科学衛星「あすか」および「ASTRO-E」
の姿勢制御系
第 122 号 (2003 年 3 月) 新精測レーダ
第 123 号 (2003 年 3 月) 鹿児島宇宙空間観測所 34m アンテナ科学衛星追跡局
第 124 号 (2003 年 9 月) 多層膜回析格子の開発
第 125 号 (2003 年 9 月) 統計的推測手法を用いた惑星雲移動ベクトルの誤差評
価法

宇 宙 科 学 研 究 所 報 告

第 126 号

2003 年 9 月

発行者 宇宙科学研究所
〒 229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1
電話 (042) 759-8009
印刷者 藤原印刷 株式会社
〒 186-0003 東京都国立市富士見台 3-6-4
電話 (042) 573-3090

AS