

JAERI - M
93-197

HTTRのIG-110黒鉛構造物の
受入検査における渦流探傷試験

1993年9月

石原 正博・七種 明雄・伊与久達夫
塩沢 周策・大岡 紀一・神戸 護*
高橋 正昭*・田中 康博*・進藤 嘉久**
河江 秀俊**

HTTRのIG-110黒鉛構造物の受入検査における渦流探傷試験

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

石原 正博・七種 明雄・伊与久達夫・塩沢 周策
大岡 紀一・神戸 護*・高橋 正昭*・田中 康博*
進藤 嘉久**・河江 秀俊**

(1993年9月8日受理)

高温工学試験研究炉(HTTR)の炉心及び炉心支持黒鉛構造物のうち原子炉級微粒等方性IG-110黒鉛構造物の加工後、受入検査において非破壊検査として渦流探傷試験を計画している。金属材料に対する渦流探傷試験の実績は十分有り、その検査基準は確立されている。しかしながら、多孔質材料の黒鉛材料は金属材料と特性が異なるため、鋼構造物等の金属材料に対する渦流探傷試験方法をそのまま黒鉛構造物に適用できない。このため、IG-110黒鉛製品を対象とした渦流探傷試験の方法及び条件を明確にした。

Eddy Current Testing on Structures of Nuclear-grade
IG-110 Graphite for Acceptance Test in HTTR

Masahiro ISHIHARA, Akio SAIKUSA, Tatsuo IYOKU, Shusaku SHIOZAWA
Norikazu OOKA, Mamoru KAMBE^{*}, Masaaki TAKAHASHI^{*}
Yasuhiro TANAKA^{*}, Yoshihisa SHINDO^{**} and Hidetoshi KAWAE^{**}

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 8, 1993)

Core and core support graphite structures in the HTTR are mainly made of IG-110 graphite which is fine-grained isotropic and nuclear-grade. Nondestructive inspection with eddy current testing is planned to be applied to these graphite structures. Eddy current testing is widely applied to metallic structures and its testing method has been already established. On the other hand, the characteristics of graphite are quite different in micro-structure from these of metals. Therefore, the eddy current testing method provided for metallic structures can not be applied directly to graphite structures. Thus the eddy current testing method and condition were established for the graphite structures made of IG-110 graphite.

Keywords: Graphite, Eddy Current, Nondestructive Inspection, HTTR,
Gas-cooled Reactor, Acceptance Test

* Fuji Electric Co., Ltd.

** Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 試験条件の検討	6
2.1 サポートポスト	6
2.2 制御棒案内ブロック	11
3. 欠陥の検出性	31
4. おわりに	33
謝 辞	33
参考文献	33
付録 IG-110黒鉛構造物の渦流探傷試験方法	34

Contents

1. Introduction	1
2. Discussion of Testing Condition	6
2.1 Support Post	6
2.2 Control Rod Guide Block	11
3. Flaw Detectability	31
4. Conclusion	33
Acknowledgements	33
References	33
Appendix Eddy Current Method on IG-110 Graphite Structures	34

1. はじめに

高温工学試験研究炉(H T T R)の炉心は高温となるため、炉内の構造物には、耐熱性に優れた黒鉛、炭素等を主要材料として使用する。炉心は、六角柱状の黒鉛ブロックである燃料体黒鉛ブロック、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロック等を円柱状に積上げたものである。さらに、炉心を支持し荷重を圧力容器へ伝えるとともに熱遮へい、放射線遮へい等のために、固定反射体ブロック、高温プレナムブロック、サポートポスト、炉床部断熱層等からなる炉心支持黒鉛構造物を設けている。H T T R炉心及び炉内構造物の配置図を第1.1図に示す。

これら黒鉛及び炭素製の構造物の設計、使用材料の選定及び検査は、「高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針」⁽¹⁾に基づいて行う。ここで、当該構造設計方針では、使用材料は別途定める「黒鉛検査基準」に適合するものとする、としている。そこで、日本原子力研究所(原研)では、これら構造物の品質を保証するために、所内外の専門家の協力も得て黒鉛検査基準を定めた⁽²⁾。本黒鉛検査基準は材料検査、非破壊検査、寸法検査及び外観検査から構成される。ここで、黒鉛構造物の素材及び加工後の製品に対しては、構造物の健全性を保証するため非破壊検査による欠陥検査を行うことを規定している。第1.1表は、安全機能及び応力状態等を勘案して定めた非破壊検査を必要とする構造物を示したものである⁽²⁾。素材の段階では、内部欠陥の検出を目的とした非破壊検査(超音波探傷試験)を行うこととし、その検査方法及び条件は既に定められている⁽³⁾。加工後の製品段階では、表面欠陥の検出を目的とした非破壊検査(渦流探傷試験)を行うこととしている。

渦流探傷試験は、鋼構造物等の製造時の検査、製品の検査、並びに発電所や化学プラントにおける熱交換器や復水器における配管の保守検査等に広く用いられている。このように、鋼構造物に対しては渦流探傷試験の実績は十分あり、その検査方法は確立されている。しかしながら、黒鉛材料に対しては実績例も少なく渦流探傷試験の方法も確立されていない。多孔質材料の黒鉛材料は金属材料と特性が異なるため、鋼構造物に対する渦流探傷試験の方法及び条件をそのまま黒鉛構造物に適用できない。このため、原子炉級微粒等方性IG-110黒鉛及び原子炉級準等方性PGX黒鉛の構造物に対する渦流探傷試験の方法及び条件等の詳細について、黒鉛材料の特徴を考慮して策定する必要がある。

渦流探傷試験による欠陥の検出性は、試験対象物の表面組織に大きく依存する。IG-110黒鉛は微粒で、PGX黒鉛の粒径に比べて1桁程度小さく、両者の黒鉛を同一の方法及び条件で渦流探傷試験することはできない。そのため、ここでは、先ず、表面組織が緻密なIG-110黒鉛製の制御棒案内ブロック(第1.2図)及びサポートポスト(第1.3図)に対して原研及びメーカーが行う渦流探傷試験での試験方法、試験条件等について、探傷部位を模擬した試験体を用いた各種条件下の渦流試験に基づいて検討した。

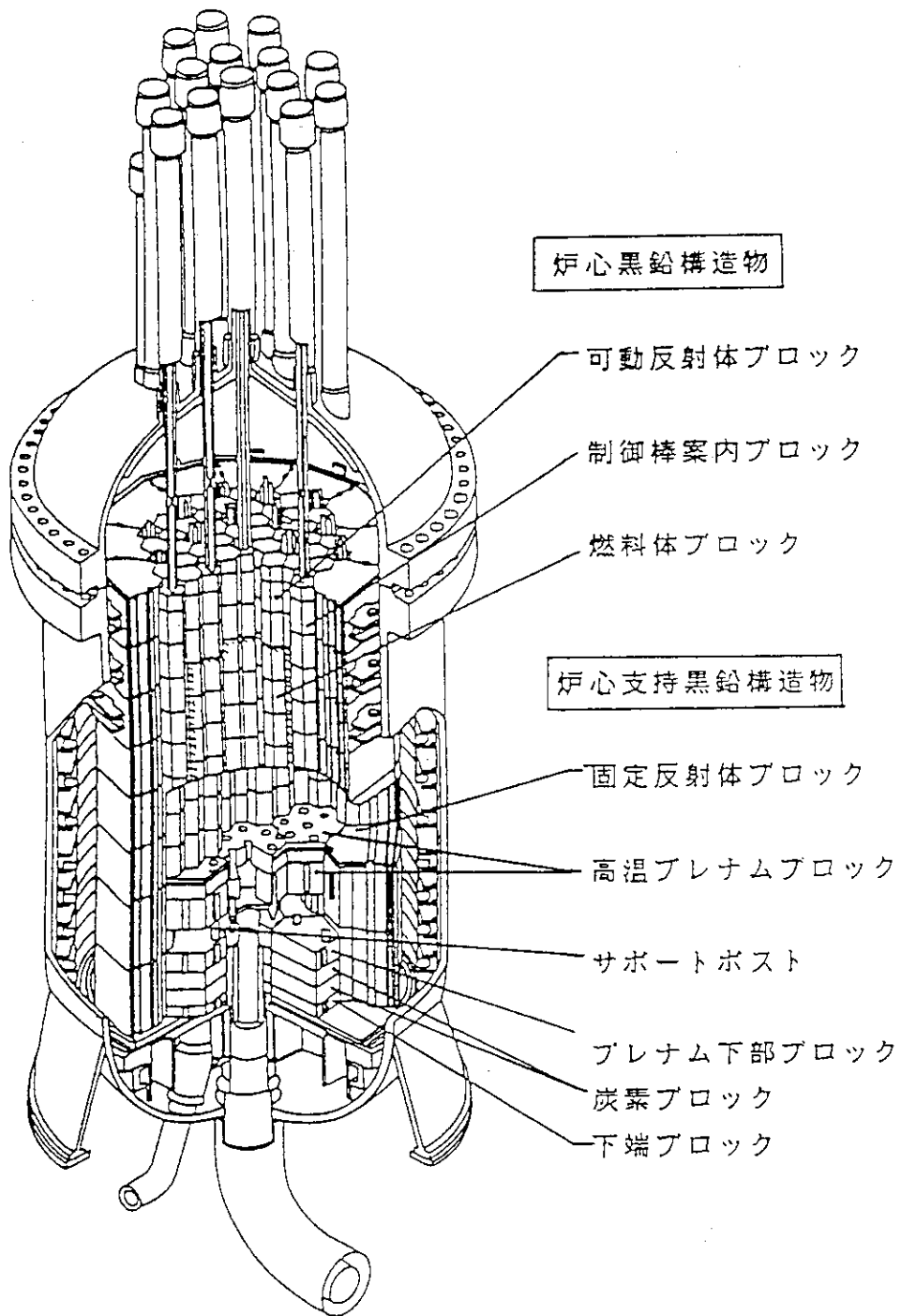
本報告は、H T T RのIG-110黒鉛構造物の受入検査における渦流探傷試験の試験方法、試験条件等に対する検討結果をまとめたものである。なお、PGX黒鉛構造物に対する渦流探傷試験については別途報告する予定である。

第1.1表 非破壊検査を実施する構造物⁽²⁾

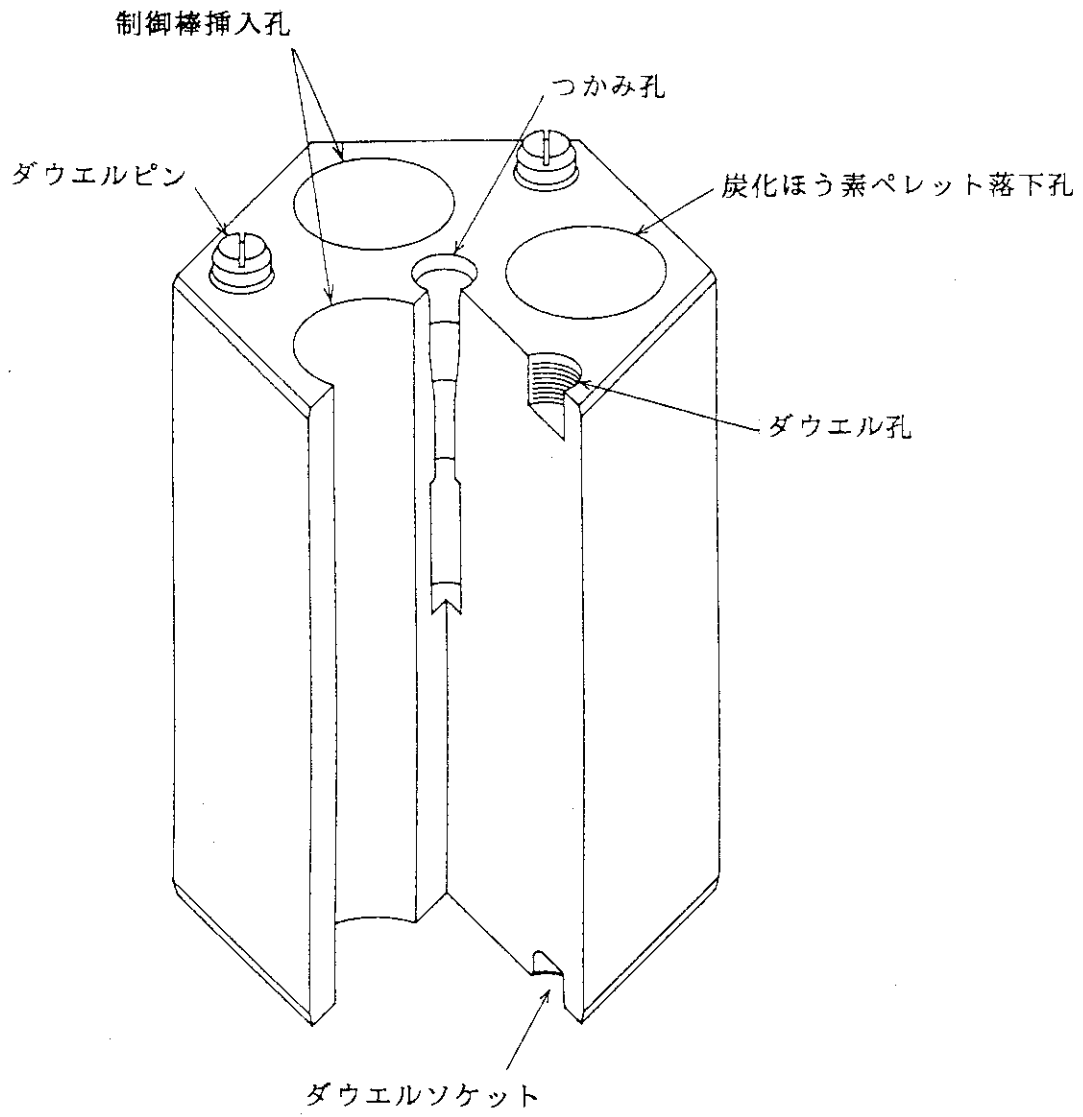
構 造 物	非破壊検査		備 考
	素材	加工後	
制御棒案内ブロック	UT	ET	ETはダウエル部近傍のブロック表面について実施する。
シール用高温プレナムブロック	--	ET	ETはダウエル部近傍のブロック表面について実施する。
キー結合用高温プレナムブロック	--	ET	ETはキー溝部表面について実施する。
サポートポスト及びポストシート	UT	ET	ETはポスト・シート接触部のみ実施する。

注1) UT: 超音波探傷試験、ET: 渦流探傷試験

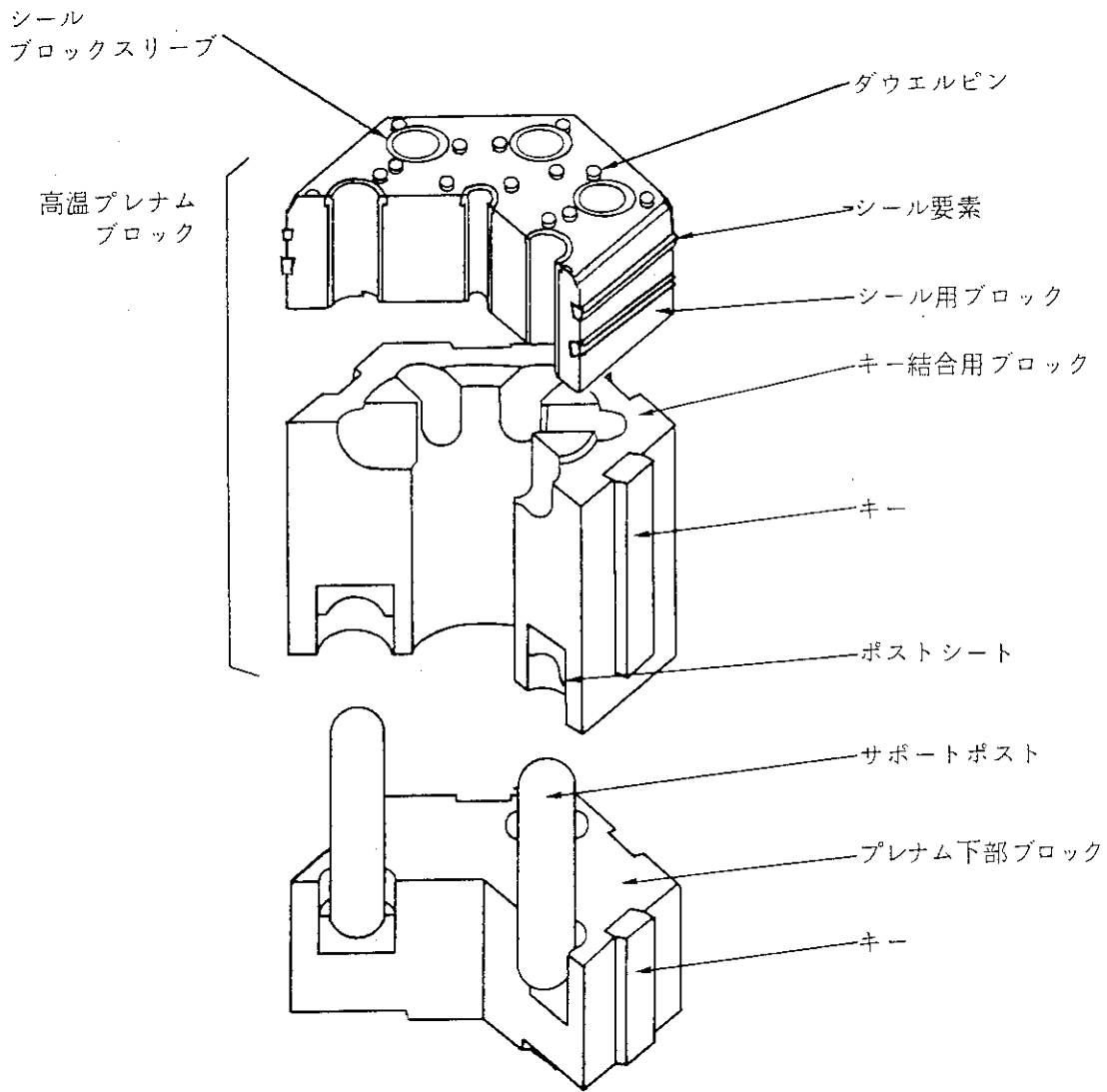
注2) 備考のダウエル部はダウエル孔とダウエルソケットをさす。



第1.1図 HTTRの黒鉛構造物の配置図



第1.2図 制御棒案内ブロックの構造図



第1.3図 サポートポスト及びポストシートの構造図

2. 試験条件の検討

渦流探傷試験が規定されている原子炉級微粒等方性黒鉛(IG-110黒鉛)構造物の部位の形状には、球面(サポートポスト及びポストシート)及び平面(制御棒案内ブロック)の2種類がある。この探傷面の形状の違いにより欠陥の検出性が異なる可能性があるため、両探傷面についての探傷特性を調べ試験条件の検討を行った。

なお、本試験条件の検討により策定したIG-110黒鉛構造物に対する渦流探傷試験方法を付録に示す。

2.1 サポートポスト

2.1.1 試験装置

試験装置は、渦流探傷器、プローブ等から構成される。

(1) 渦流探傷器

IG-110黒鉛にスリット状の人工欠陥(スリット欠陥)を設けた試験体を用い、試験周波数を変化させた場合の渦流探傷試験結果より、IG-110黒鉛に対する渦流探傷試験では試験周波数が1MHz以上になると欠陥の検出性がよくなることが認められている^{(4)、(5)}。従って、渦流探傷器として9.9MHzまでの適用が可能なディフェクトスコープ渦流探傷器(フェルスタ社製、型式; SD2.832)を用いることとした。

(2) プローブ

プローブには、自己誘導型と相互誘導型とがある。第2.1.1図に示すように両者間の感度及び欠陥の検出性には差が認められない。また、探傷面が球面や凹面であるため、構造が簡単で小型化が可能なプローブが適していることから、自己誘導・自己比較型のマイクロプローブを使用することとした。

(3) 渦流探傷装置

プローブの走査は、探傷結果の安定性及び信頼性の観点から、決められた範囲のリフトオフ(プローブと探傷面間のギャップ)と走査ピッチを保ちながらプローブ走査を行う、自動探傷装置にて行うこととした。

2.1.2 試験体

試験条件や探傷性能を検討するために、スリット欠陥を設けた板状試験体及び実機を模擬し曲面部にスリット欠陥を設けた試験体による欠陥探傷を行った。探傷試験に用いた試験体の形状を第2.1.2図から第2.1.4図に示す。ここで、スリット欠陥の幅は0.3mmである。

2.1.3 試験結果と考察

(1) プローブ周波数と試験周波数

試験周波数は、プローブ、探傷器及び検査対象となる材料の組み合わせで最もマッチングのとれる良好な欠陥の検出性を有する帯域とする必要があるため、長さ(l)1mm×深さ(d)1mmのスリット欠陥を用いて、試験周波数をパラメータに欠陥の検出性を調べた。その結果を第2.1.5図に示す。図中、Sは欠陥信号出力、Nは欠陥信号出力近傍におけるノイズ信号出力の最大である。この図から、プローブ周波数が1MHzの場合では試験周波数が1.4~2.5MHz、プローブ周波数が4MHzの場合では試験周波数が3.9~4.3MHzの範囲で、それぞれ良好な欠陥の検出性が得られることがわかる。

従って、受入検査における試験周波数は、欠陥の検出性が良い4MHzとする。

(2) 探傷範囲

サポートポストとポストシートの探傷対象部はこれらの接触部と規定されている⁽²⁾。しかし、地震時等におけるサポートポストの僅かな傾きを考慮して、受入検査での探傷範囲は、保守的にサポートポスト及びポストシートの球面部とする。

なお、渦流探傷試験の場合、球面端部のように探傷面が急変している部位では、急変部の影響を受け、端面部は欠陥信号を明瞭に検出することができないため、直径1mm、深さ1mmの欠陥を用いて端面部における欠陥信号を調べた。この結果を第2.1.6図に示す。同図から、端面部より約2mmの範囲に存在する欠陥信号は、端面部の影響を受け判別しにくいことが明かとなった。これは、黒鉛材料に特有の問題ではなく、渦流探傷試験の端末効果によるものである。

(3) 探傷感度の調整

(i) 探傷感度調整レベル

欠陥の探傷では、まず、ノイズ信号出力を越える欠陥が存在する場合は、確実にこの欠陥をブラウン管(CRT)上に検出できるような探傷感度を確保することが必要である。このためには、少なくとも最大ノイズ信号出力(N_{max})がCRT上に認められるような探傷感度にする必要がある($N_{max} > 0\%$)。次に、少なくとも検出レベル以下の信号出力を有する欠陥については、その欠陥信号がCRT、Y軸フルスケールの中に収まるようにすることが、欠陥を検出し、かつ、その程度を評価する上で重要である。ここで、IG-110黒鉛構造物に対する検出レベルは、欠陥信号出力(S)と N_{max} との比が3($S/N_{max}=3$)となるように、 N_{max} に対して、3倍高いレベルである⁽²⁾。

このため、CRT上に出るノイズ信号出力の特性を明かにするために、平板状試験体(第2.1.2図)の無欠陥部分を長手方向にリフトオフをパラメータにノイズ信号出力を調べた。その結果の代表例を第2.1.7図(a)に示す。本図にみられるように、個々の位置で得られるノイズと全体に大きくうねるノイズの二つのパターンが観察された。即ち、前者は N_{max} に相当し、後者はCRT、Y軸方向のノイズ信号出力の基線位置が脈流変動するもの(N_{max}')に相当

する。脈流変動が大きくなると、欠陥等の信号がCRT、Y軸のフルスケールを飛び出し観察出来ない現象が起きる。特に、探傷感度の調整時に N_{max} の設定を大きくすると、この現象がより顕著になる。探傷感度の調整、即ち N_{max} の調整高さは、この脈流変動の程度を考慮して設定する必要がある。第2.1.7図(b)は、リフトオフの変化に応じた脈流変動の程度を N_{max}'/N_{max} の比で示したものである。受入検査では、後述するようにリフトオフは0.2mmから0.4mmと定めており、それに対応する脈流変動 N_{max}' はリフトオフ0.4mmの時が最大を示し、その値は N_{max} の2.5倍($N_{max}'/N_{max}=2.5$)になることがわかる。さらに、この脈動がY軸上下方向に最大 $2.5N_{max}$ の振幅分だけずれるものと保守的に考えると、 $S/N_{max} \leq 3$ の欠陥信号出力を、CRT、Y軸のフルスケール100%(CRT、Y軸100%)の画面内に表示するための N_{max} のレベルは、14%以下となる($N_{max} \leq 14\%$)。

従って、 N_{max} の調整高さは、受入検査において $S/N_{max} \leq 3$ をCRTで十分観察できるようにCRT、Y軸5%とすることとした。

(ii) 感度増幅値(STB-A1試験片感度)

黒鉛の対比試験片の規格がないため、受入検査においては、公的に検定・管理された標準試験片であり、安定した再現性の良い信号が得られるJIS Z 2345(1987)「超音波探傷用標準試験片」の超音波探傷用A1形標準試験片(STB-A1試験片)を対比試験片として用いることとした。STB-A1試験片の形状を第2.1.8図に示す。IG-110黒鉛以外の対比試験片を用いるため、試験周波数4.0MHzにおいてIG-110黒鉛で N_{max} の調整高さがCRT、Y軸5%を得るために必要なSTB-A1試験片の感度を調べた。その結果を第2.1.9図に示す。本図より、STB-A1試験片の感度はIG-110黒鉛探傷時のリフトオフとSTB-A1試験片の0.5mm幅スリット信号出力をCRT、Y軸100%に調整した後増幅すべきdB値に比例関係が認められた。本図より、リフトオフが0.2mmから0.4mmに応じたSTB-A1試験片の感度、即ち、STB-A1試験片の0.5mm幅スリット信号出力をCRT、Y軸100%に調整した後の増幅すべきdB値は、18dB(リフトオフ0.2mm)、20dB(リフトオフ0.3mm)及び22dB(リフトオフ0.4mm)となる。この増幅量によって、STB-A1試験片とIG-110黒鉛間の探傷感度の違いを補正していることになるが、補正の内容には、STB-A1試験片とIG-110黒鉛との探傷時のリフトオフの違い、探傷感度調整対象の違い(STB-A1試験片は0.5mm幅スリット、IG-110黒鉛は材料表面のバックグラウンドノイズ)等が含まれる。

以上の検討結果に基づき、受入検査における探傷感度の調整手順は、まずSTB-A1試験片の0.5mm幅スリットをリフトオフ0mmで探傷して得られる信号出力がCRT、Y軸の最大となるように位相を調節する。次に、この信号出力をCRT、Y軸100%になるようにした後、探傷時のリフトオフに応じて探傷器のゲインを高めることとした。この探傷感度は、試験周波数4.0MHzにおいて、IG-110黒鉛の N_{max} が、それぞれのリフトオフに応じてCRT、Y軸5%になるような探傷感度に相当している。

(4) 位相角の調整

信号電圧と基準とする電圧の位相差である位相角は、欠陥の検出性(S/N_{max})に影響を及ぼす。IG-110黒鉛を探傷するための位相角は、欠陥信号出力が最大になる位相角でもなけ

れば、ノイズ信号出力が最小になる位相角でもなく、それらの比S/Nmaxを最大とするものである。そのため、IG-110黒鉛における欠陥の検出性が最も良くなる位相角を調べた。

(i) S/Nmax最大となる位相角

試験周波数1.6MHz及び4.0MHzについて、リフトオフを変化させた場合の位相角とS/Nmaxの関係を調べた。試験体に加工された $\phi 1\text{mm} \times d0.5\text{mm}$ のスリット欠陥を検出するための位相角とS/Nmaxの関係を第2.1.10図に示す。図は、リフトオフ0mmで探傷したときのスリット欠陥信号出力が最大となる位相角を 0° として示してある。図中の()の位相角は装置の位相角調度の表示値を示す。本図より、いずれの試験周波数も位相角が $45^\circ \pm 15^\circ$ で最大のS/Nmaxを示すことが明かとなった。スリット欠陥信号出力が最大となる位相角 0° でS/Nmaxが最大とならない理由は、スリット欠陥信号出力が最大となる位相角とノイズ信号出力が最小となる位相角が、それぞれ異なることを意味している。また、同図より試験周波数1.6MHzと試験周波数4.0MHzとを比較すると、試験周波数4.0MHzの方が僅かではあるが欠陥の検出性(S/Nmax)が高く、リフトオフを大きく採れることがわかる。

(ii) STB-A1試験片感度調整時の位相角調整

受入検査において対比試験片としてSTB-A1試験片を用いるため、IG-110黒鉛で最大のS/Nmaxを得るのに必要なSTB-A1試験片の位相角補正值を定める必要がある。そこで、リフトオフをパラメータに試験周波数4.0MHzにおいてSTB-A1試験片の位相角補正值を求めた。その結果を第2.1.9図に点線で示す。本図は、STB-A1試験片の0.5mm幅スリット信号出力が最大となる位相角とIG-110黒鉛スリット欠陥で最大のS/Nmaxを得るために必要な位相角の違いを示したものである。リフトオフが0.2mmから0.4mm応じたSTB-A1試験片位相角補正值は、 -86° (リフトオフ0.2mm)、 -82° (リフトオフ0.3mm)及び -78° (リフトオフ0.4mm)となり、リフトオフが大きくなっても位相角補正值はほとんど変化しないことが明かとなった。

従って、リフトオフが0.2mmから0.4mmの範囲内では位相角補正值を一定にしてもよいといえる。これを確認するために、リフトオフが0.3mmに相当する位相角補正值 -82° とした場合の探傷をリフトオフをパラメータに行った。その結果を第2.1.11図に示す。同図より、リフトオフが0.2mmから0.4mmの範囲内ではS/Nmaxの値はほとんど変化しないことがわかる。この位相角補正值には、STB-A1試験片とIG-110黒鉛の材質の違い、STB-A1試験片とIG-110黒鉛の対象欠陥の形状の違い、STB-A1試験片とIG-110黒鉛での探傷時のリフトオフの違い、IG-110黒鉛でのS/Nmaxの位相角の補正分(45°)が含まれる。

以上より、受入検査では、STB-A1試験片の0.5mm幅スリット信号出力がCRT、Y軸で最大となるように位相角を定めて感度調整を行い、その後、探傷器の位相角調度を -82° 補正することとした。

(5) リフトオフ

試験周波数4.0MHzについて、リフトオフを変化させた場合のS/Nmaxの変化を調べた。試験は位相角をS/Nmaxが最大となる条件、即ち、欠陥信号出力Y軸最大に対して 45° ずらした

状態で行った。この結果を第2.1.12図に示す。本図より、 $\varnothing 1\text{mm} \times d0.5\text{mm}$ の水平及び垂直方向のスリット欠陥を黒鉛検査基準で規定された検出レベル($S/N_{\text{max}}=3$)⁽²⁾で検出するためには、リフトオフが0.43mm以下であれば良いことがわかる。また、プローブのIG-110黒鉛の表面への接近性を考慮して、リフトオフの下限を0.2mmとした。これらのことから、受入検査では、リフトオフを0.2mmから0.4mmの範囲とした。

(6) 走査速度と走査ピッチ

(i) 走査速度

試験周波数4.0MHzを用いて、リフトオフを0.4mmで走査速度を変化(装置の最大走査速度;200mm/s)させた場合の欠陥の検出性を第2.1.13図に示す。同図より、走査速度が200mm/sまでは、走査速度が変化しても、欠陥の検出性は、変化しないことが明らかとなった。

(ii) 走査ピッチ

試験周波数4.0MHzを用いて、リフトオフ0mmから0.6mmの範囲で変化させた場合の $S/N_{\text{max}}=3$ となる走査ピッチを第2.1.14図に示す。図より、 $\varnothing 1\text{mm} \times d0.5\text{mm}$ のスリット欠陥を $S/N_{\text{max}}=3$ ⁽²⁾で検出するための走査ピッチは、リフトオフが0.4mmの場合では0.6mm以下、リフトオフが0.3mmの場合では0.72mm以下、リフトオフが0.2mmの場合では0.85mm以下となることがわかる。

従って、受入検査では、リフトオフが0.2mmから0.4mmの範囲においてプローブの走査ピッチを0.6mm以下と保守的に設定した。

(7) 最大ノイズ信号出力(N_{max})

受入検査においてIG-110黒鉛に対する N_{max} を実機で用いる探傷装置で定める必要がある。このため、試験周波数4.0MHzを用いて、リフトオフが0mmから0.6mmの範囲における N_{max} を調べた。試験は、 S/N_{max} がCRT、Y軸で最大となる位相角に調整して行った。その結果を第2.1.15図に示す。同図より、 N_{max} はリフトオフの1次関数として(2.1)式で表されることがわかる。

$$N_{\text{max}} = 22 L + G \quad (2.1)$$

ここで、 N_{max} : 最大ノイズ信号出力(dB)

L : リフトオフ(mm)(0~0.6mmの範囲)

G : リフトオフ0mmにおける N_{max} をCRT、Y軸100%に調整するのに必要な装置のゲイン調度目盛りの読みで、探傷器およびプローブの組み合わせによって決まる定数(dB)。

なお、プローブの交換等で G の値が変わる場合には、感度調整を行い、 G の値を補正すべきである。

2.2 制御棒案内ブロック

2.2.1 試験装置

渦流探傷器については、2.1.1(1)と同じ理由により、9.9MHzまでの高い周波数帯域での適用が可能なディフェクトスコープ渦流探傷器(フェルスター社製、型式;AF2.833)を用いることとした。また、プローブについては、相互誘導型と自己誘導型とでは感度及び欠陥の検出性にあまり差がないことからフェルスター社製(型式;AF2.833)との電氣的マッチングがよい同社の相互誘導・自己比較型のものを使用することとした。さらに、プローブの走査方法は、2.1.1(3)と同じ理由により自動探傷装置にて行うこととした。

2.2.2 試験体

試験条件や探傷性能を検討するために、第2.2.1図に示すようなダウエル孔及びダウエルソケットを有する試験体を用いた。試験体の表面部には、スリット欠陥を周方向と径方向に設けた。ここで、スリット欠陥の幅は0.3mmである。

2.2.3 試験結果と考察

(1) 試験周波数

試験周波数は、プローブ、探傷器及び検査の対象となる材料の組合せでマッチングのとれる良好な欠陥の検出性を有する周波数帯域とする必要があるため、試験周波数をパラメータに欠陥の検出性を調べた。その結果を第2.2.2図に示す。図中、Sは欠陥信号出力、Nは欠陥信号出力近傍におけるノイズ信号出力の最大である。この図から欠陥の検出性のよい9.9MHzを試験周波数とした。

(2) 探傷範囲

制御棒案内ブロックの探傷対象部は、ダウエル部近傍のブロック表面と規定⁽²⁾されている。ここで、ブロック表面としては、プローブがダウエル部に隣接する孔を越えない範囲で、かつ、ダウエル部近傍の高応力部分を考慮して、ブロック表面の探傷範囲の幅を第2.2.3図に示すように15mmまでとれば十分と考えられる。

なお、サポートポストと同様に渦流探傷試験の端末効果を調べた。その結果を第2.2.4図に示す。この図は、ダウエル孔及びダウエルソケットの端面(孔の円周縁)から垂直方向に $\phi 2\text{mm} \times d1\text{mm}$ のスリット欠陥を設け、リフトオフ0.2mm及び0.3mmで探傷可能範囲を調べたものである。同図中の信号a、b、c及びd、e、fは、それぞれ端面より約3mm、2mm及び1mmの位置で検出した欠陥信号で、端面より約1mmの位置では欠陥信号が認められない。従って、端面より約1mmの範囲に存在する欠陥の信号は検出されない。これは、黒鉛材料特有の問題ではなく、渦流探傷試験の端末効果によるものである。

(3) 探傷感度の調整

探傷感度の調整については、2.1.3(3)で述べた理由に基づき設定した。具体的には、受入試験における探傷感度の調整手順は、まずSTB-A1試験片の0.5mm幅スリットをリフトオフ0mmで探傷し、得られる信号出力をCRT、Y軸の最大となるように位相を調節する。次に、この信号出力をCRT、Y軸100%になるようにした後、探傷時のリフトオフに応じてリフトオフが0.2mmの場合には5dB、0.3mmの場合には6dB探傷器のゲインを高めることとした。

なお、この探傷感度は、試験周波数9.9MHzにおいて、IG-110黒鉛の最大ノイズ信号出力(Nmax)が、CRT、Y軸3%になるような探傷感度に相当している。

(4) 位相角の調整

(i) S/Nmax最大となる位相角

試験周波数9.9MHzについて、CRT上の欠陥信号がY軸からズレている位相角を 0° から 180° まで変化させた場合のS/Nmaxへの影響を調べた。 $\varnothing 1\text{mm} \times d0.5\text{mm}$ のスリット欠陥を検出するための位相角とS/Nmaxの関係を第2.2.5図に示す。同図はリフトオフ0.2mmで探傷したときのスリット欠陥のS/Nmaxが最大となる位相角を 0° として示してある。図中の()の位相角は装置の位相角調度の表示値を示す。この図より、ほぼ位相角 $0^{\circ} \pm 30^{\circ}$ の範囲で高いS/Nmaxが得られていることがわかる。

(ii) STB-A1試験片感度調整時の位相角調整

STB-A1試験片の0.5mm幅スリットを対象にリフトオフ0mmにおける信号をCRT、Y軸で最大となるように調整した位相角補正值は 270° であった。また、IG-110黒鉛スリット欠陥でのリフトオフ0.3mmにおける最大のS/Nmaxを得るために必要な位相角補正值は 240° であった。このことから、STB-A1試験片での位相角補正值は -30° となる。

従って、受入検査では、STB-A1試験片の0.5mm幅スリット信号出力がCRT、Y軸で最大となるように位相角を定めて感度調整を行い、その後、探傷器の位相角調度を -30° 補正することとした。

(5) リフトオフ

試験周波数9.9MHzについて、 $\varnothing 1\text{mm} \times d0.5\text{mm}$ のスリット欠陥を対象にリフトオフを0.1mmから0.4mmに変化させたときのS/Nmaxへの影響を調べた。この結果を第2.2.6図に示す。この図から、S/Nmaxはリフトオフが大きくなると低下するが、 $\varnothing 1\text{mm} \times d0.5\text{mm}$ のスリット欠陥をS/Nmax=3で検出するためには、リフトオフが0.35mm以下であれば良いことがわかる。また、プローブのIG-110黒鉛の表面への接近性を考慮してリフトオフの下限を0.2mmにした。

(6) 走査速度と走査ピッチ

(i) 走査速度

試験周波数9.9MHzについて、リフトオフが0.2mm及び0.3mmにおいてプローブの走査速度を43mm/sから100mm/sの範囲内で変化させたときのS/Nmaxへの影響を調べた。この結果を第

2.2.7図に示す。同図より走査速度が100mm/sまでは走査速度が変化しても欠陥の検出性は変化しないことが明らかとなった。

(ii) 走査ピッチ

走査ピッチは、プローブのコイル軌跡が探傷すべき範囲をカバーし、かつ欠陥がコイル断面内に常に存在するように決める必要がある。探傷範囲をカバーするためには走査ピッチをコイル径(約2mm)以下にすればよい。しかしながら、この走査ピッチでは、欠陥の位置がコイル境界にあった場合や、欠陥の一部がコイル断面内にある場合には、十分に高い欠陥信号出力が得られないことも考えられる。そこで、走査ピッチをコイル径の1/2である1mmとした場合の欠陥の検出性について調べた。この結果を第2.2.8図に示す。同図の信号aから信号cは垂直欠陥信号、信号d及び信号eは平行欠陥信号である。信号aは、プローブ中心が最初の欠陥端部またはその近くを、信号bは欠陥上を、信号cは他方の欠陥端部またはその近くをそれぞれ垂直に横切ったときの欠陥信号である。また平行欠陥信号d及びeは、探傷欠陥の幅が0.3mmで走査ピッチの1mmよりも十分に狭いことからプローブが2回欠陥上を通過したときに現れたものである。

従って、同図より走査ピッチが1mmであれば十分に高い欠陥信号出力が得られることが明らかとなった。

(7) 最大ノイズ信号出力(Nmax)

受入検査において、IG-110黒鉛に対するNmaxを実機で用いる探傷装置で定める必要がある。このため、試験周波数9.9MHzを用いてリフトオフが0mmから0.3mmの範囲におけるNmaxを調べた。試験は、S/Nmaxが最大となる位相角に調整して行った。その結果を第2.2.9図に示す。試験は試料の表面と裏面の両面について行った。同図より、Nmaxはリフトオフの1次関数として(2.2)式で表されることがわかる。

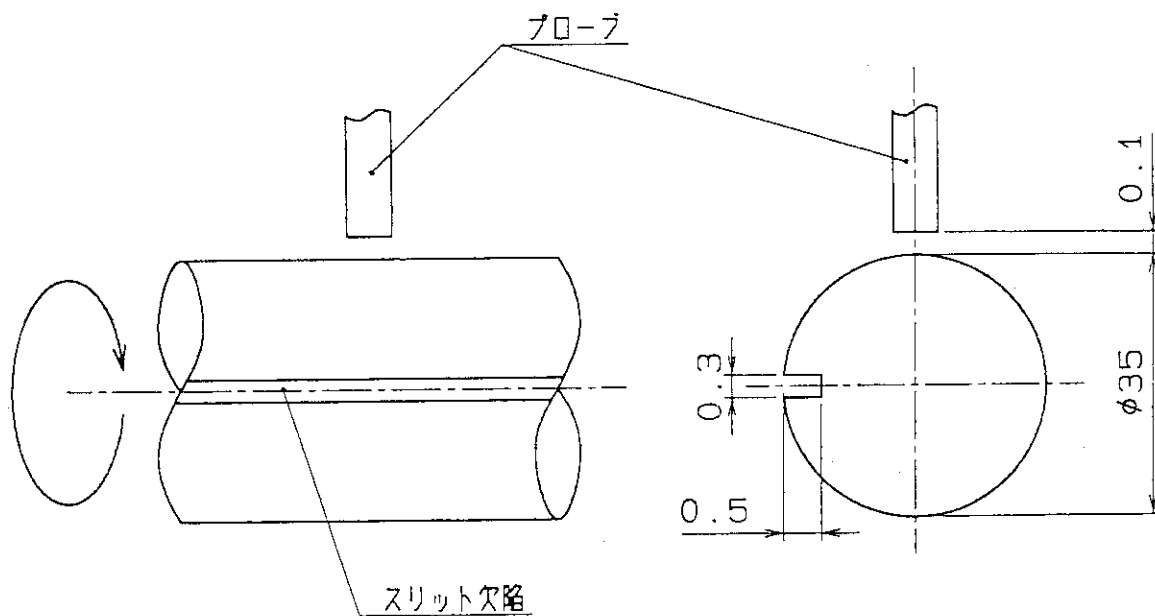
$$N_{\max} = 24.7 L + G \quad (2.2)$$


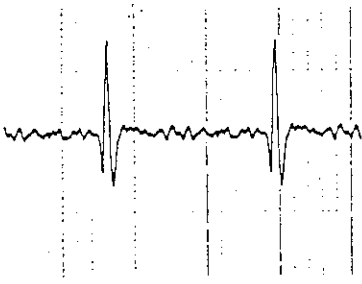
ここで、Nmax: 最大ノイズ信号出力(dB)

L : リフトオフ(mm)(0~0.4mmの範囲)

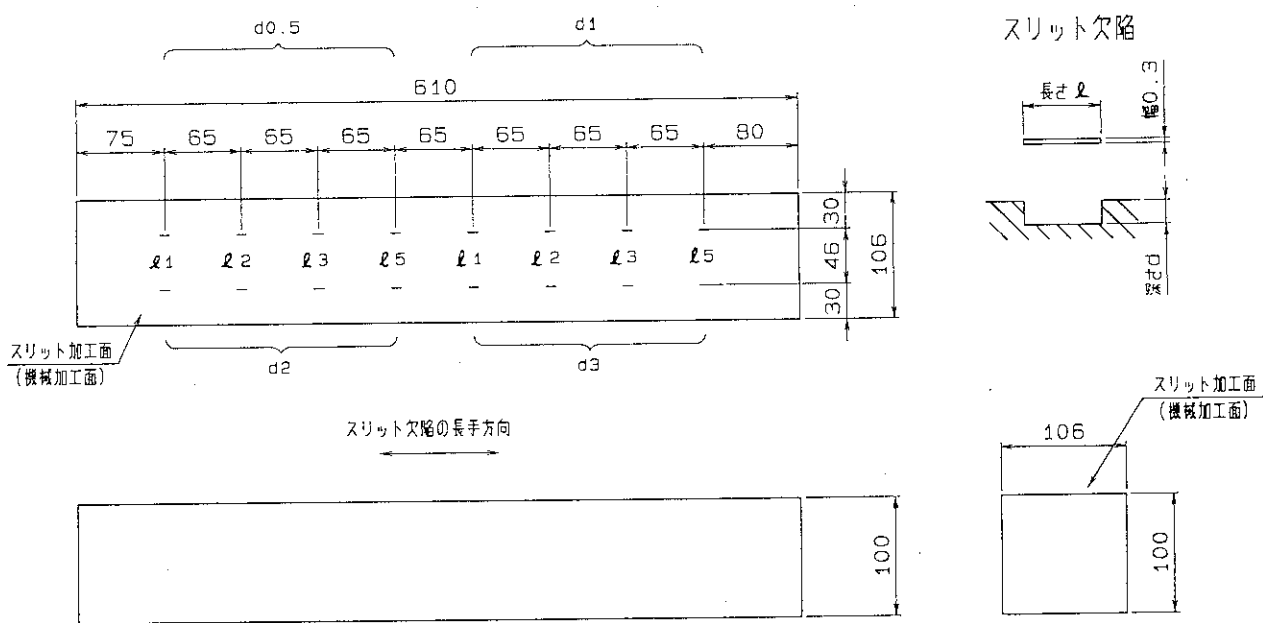
G : リフトオフ0mmにおけるNmaxをCRT、Y軸100%に調整するのに必要な装置のゲイン調度目盛りの読みで、探傷器及びプローブの組合せによって決まる定数(dB)

なお、プローブの交換等でGの値が変わる場合には、感度調整を行い、Gの値を補正すべきである。

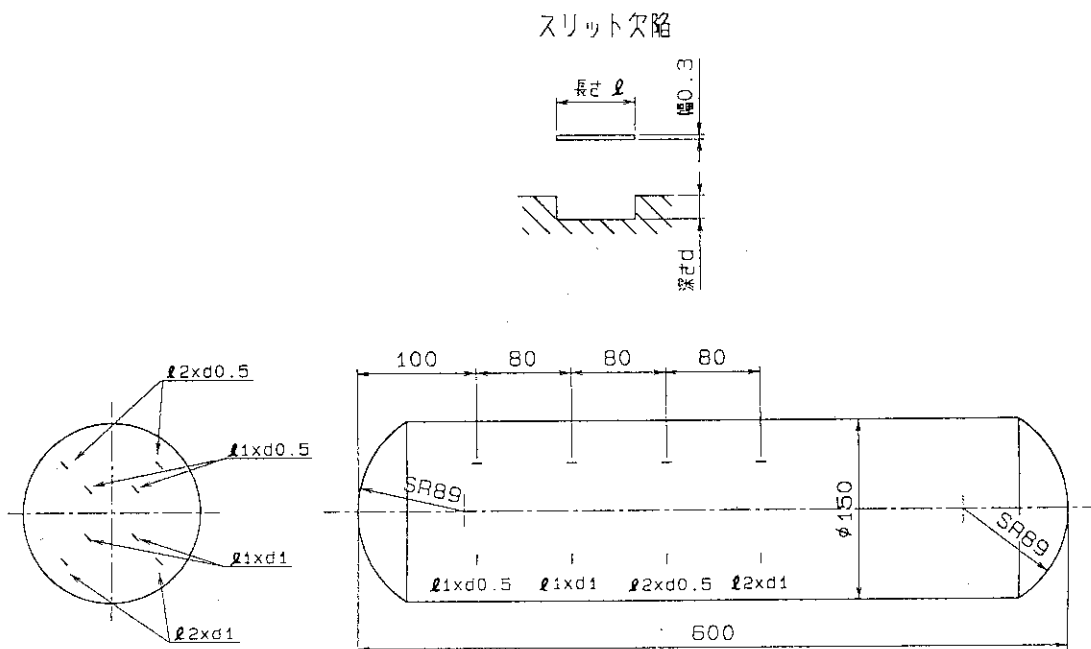


プローブ	
相互誘導・自己比較型	自己誘導・自己比較型
	
試験周波数: 512kHz ゲイン: 38dB	試験周波数: 512kHz ゲイン: 36dB

第2.1.1図 相互誘導・自己比較型プローブと自己誘導・自己比較型プローブの比較

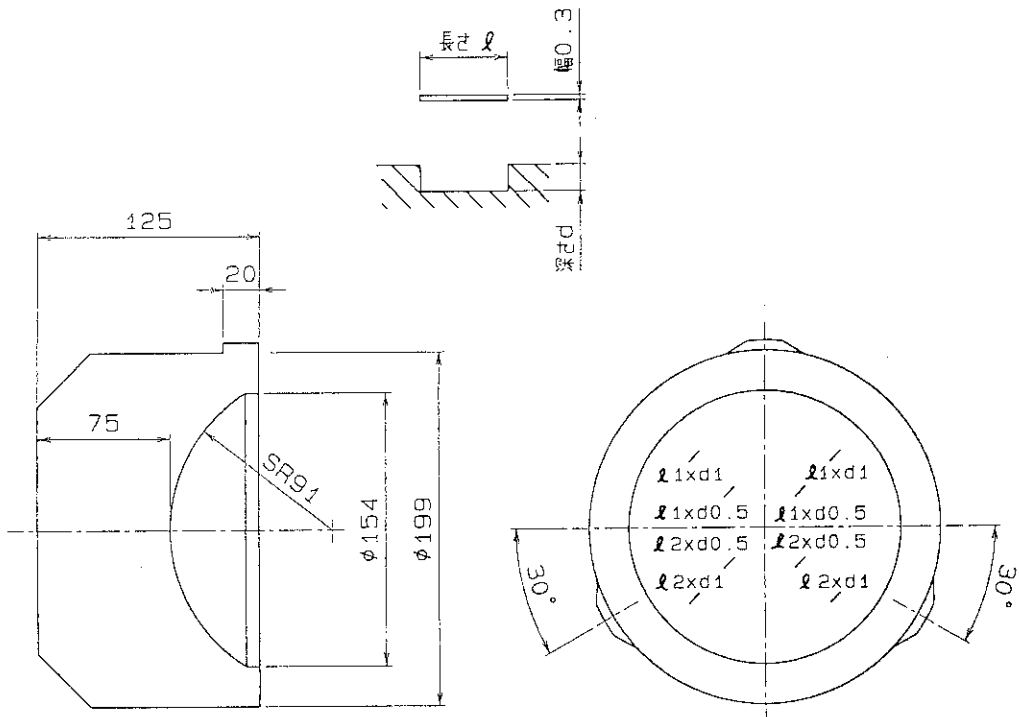


第2.1.2図 平板状試験体

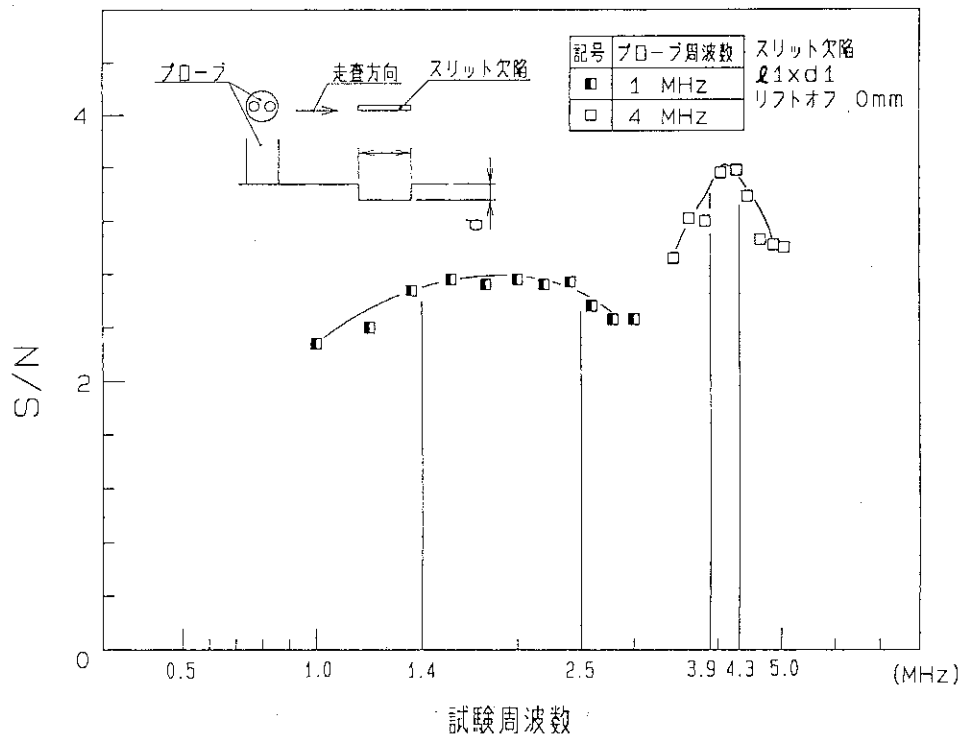


第2.1.3図 サポートポスト用試験体

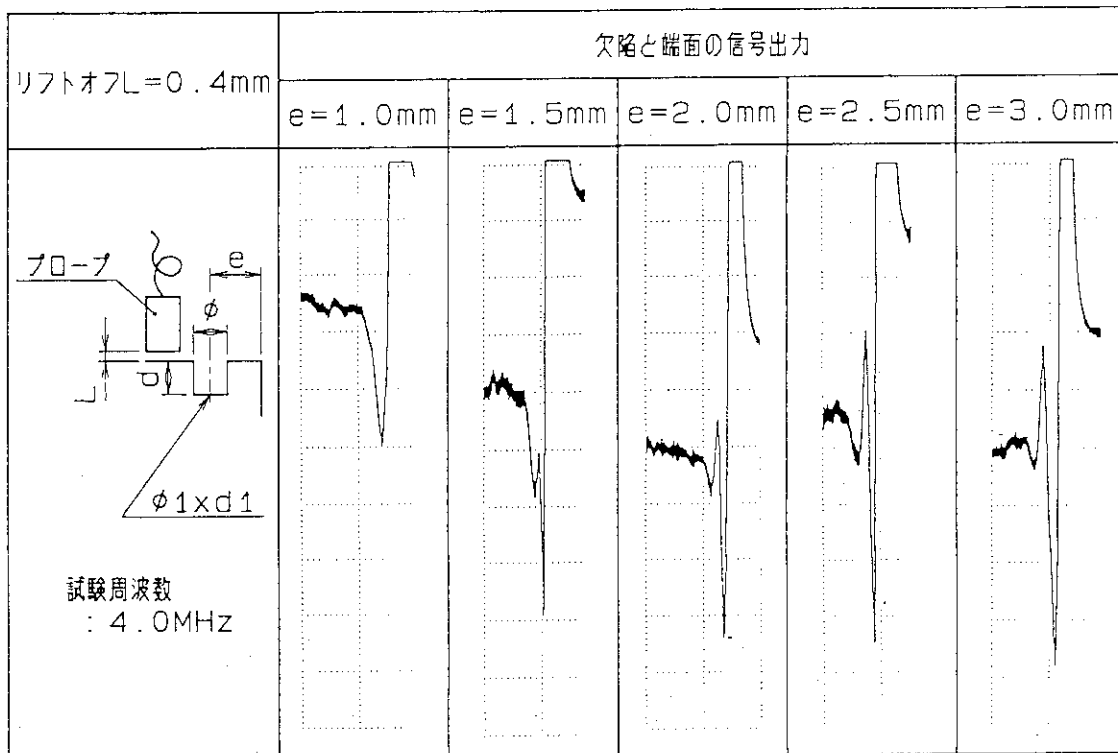
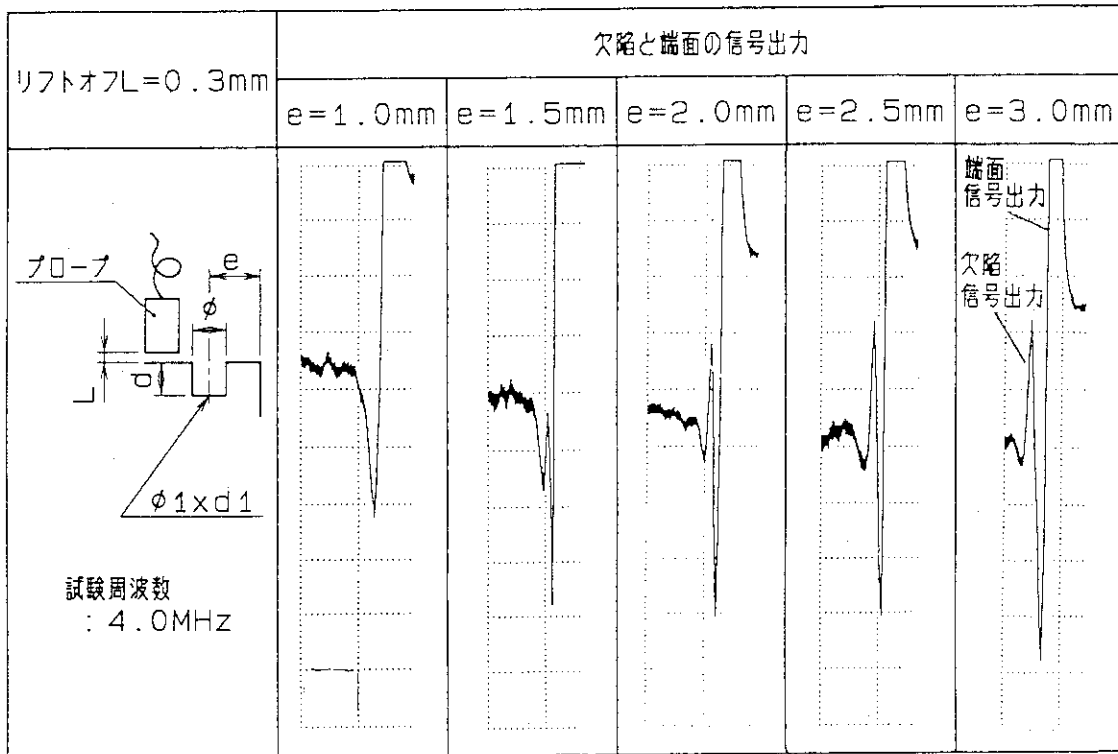
スリット欠陥



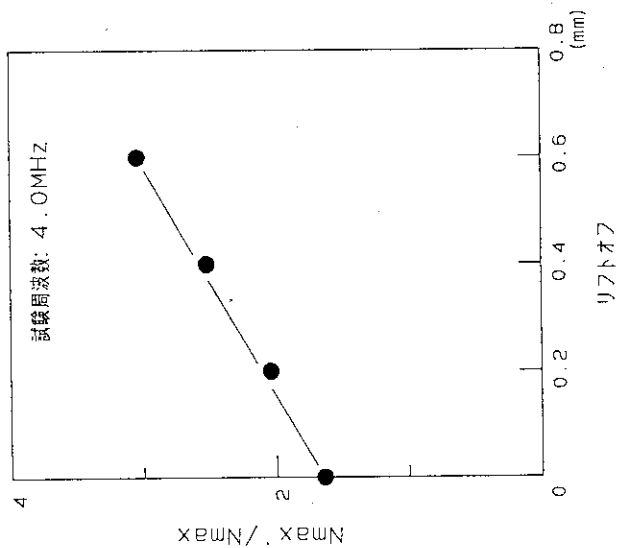
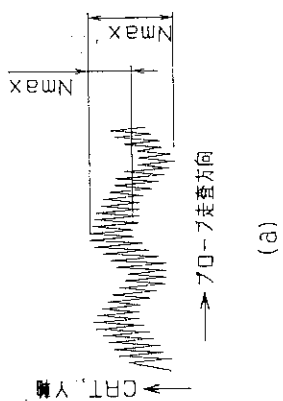
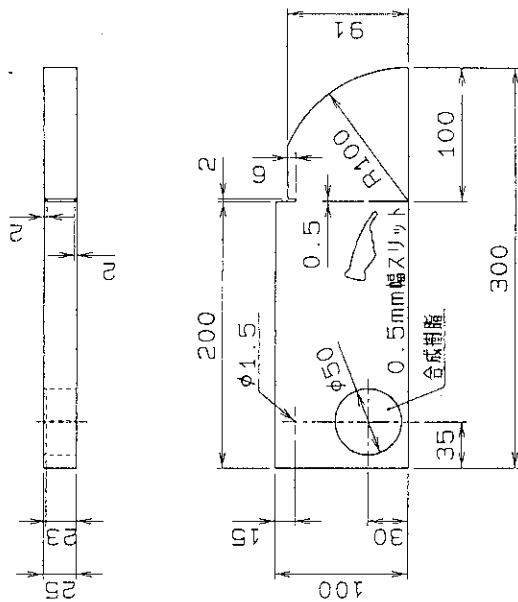
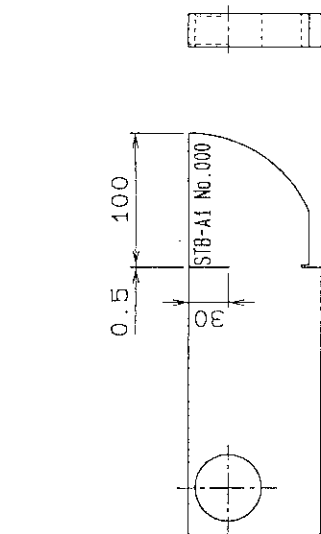
第2.1.4図 ポストシート用試験体



第2.1.5図 試験周波数と欠陥の検出性の関係

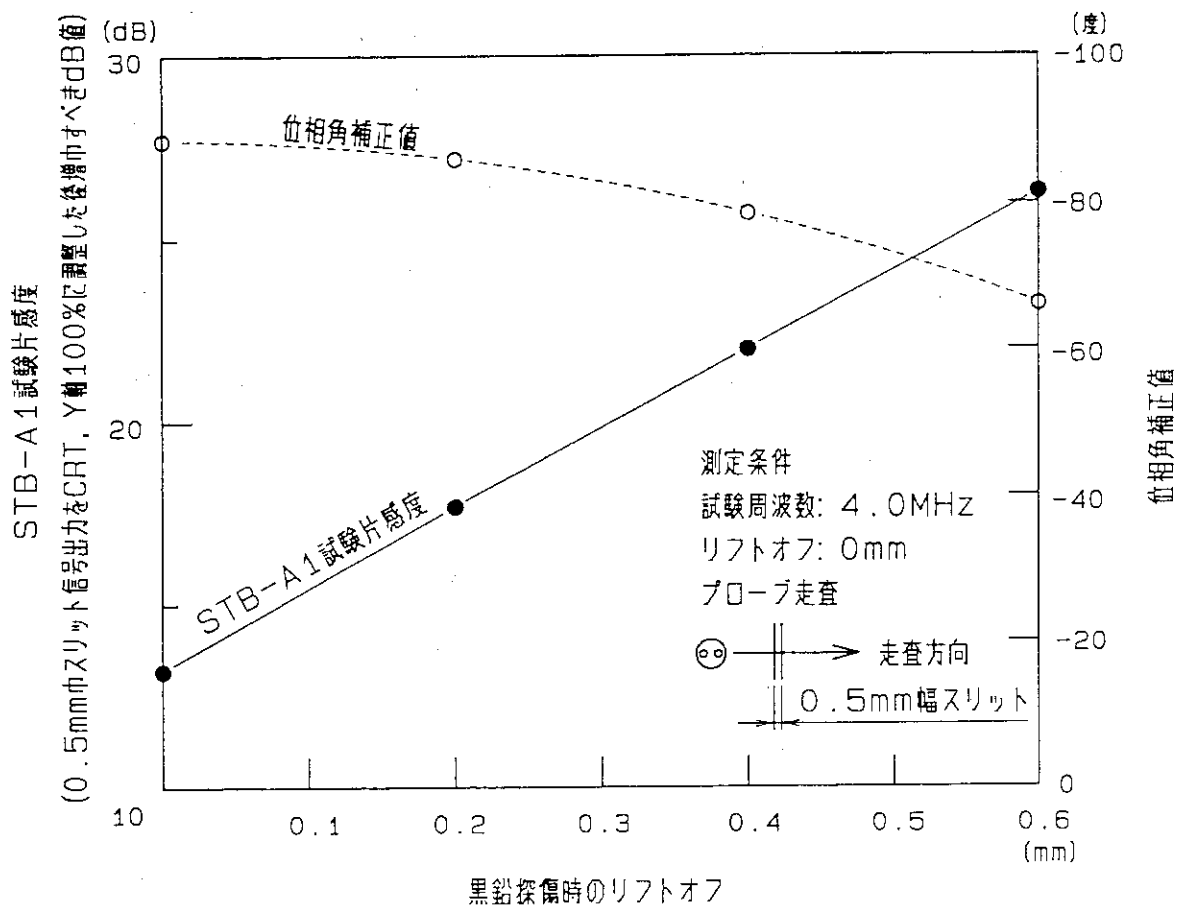


第2.1.6図 端面の影響

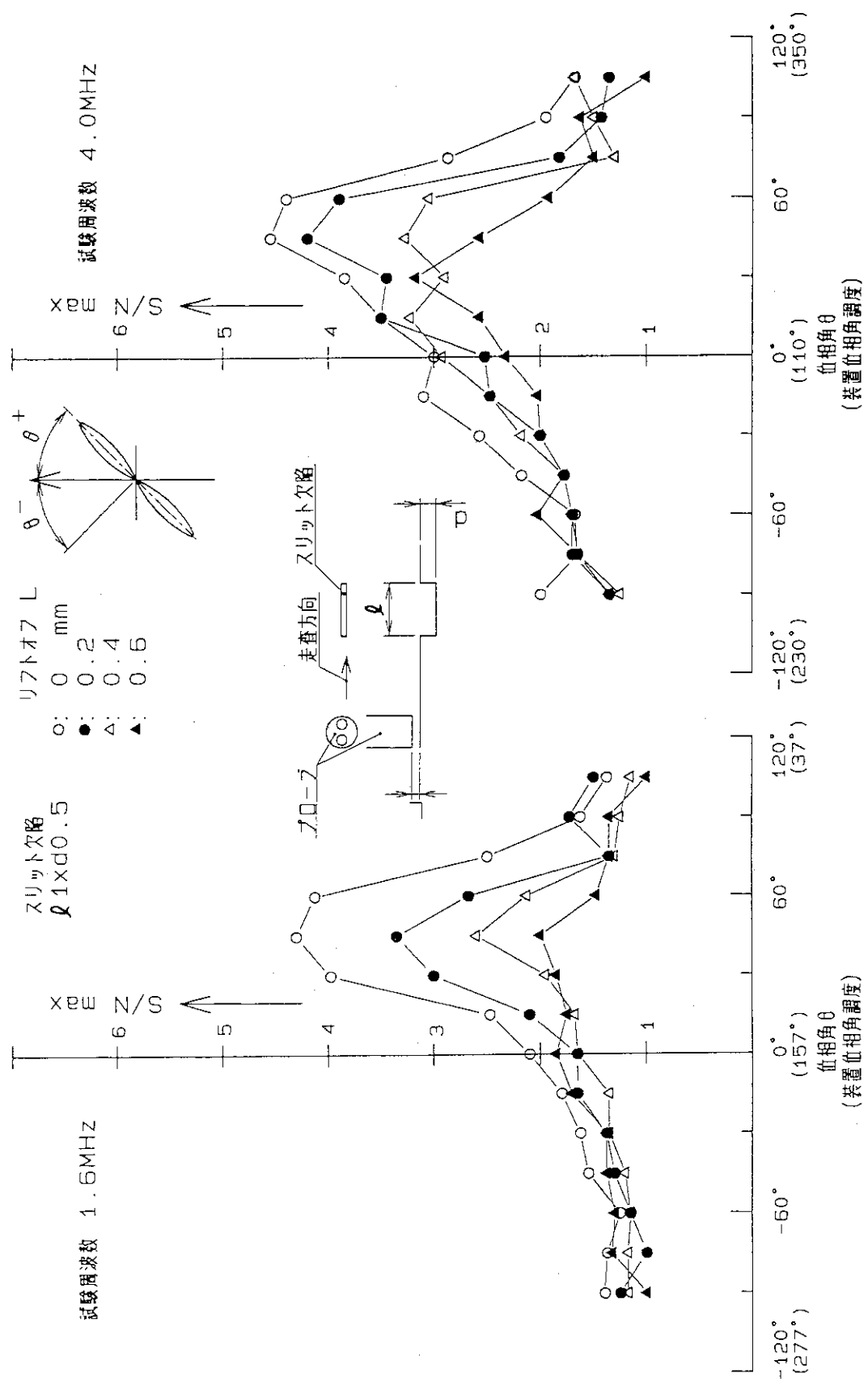


第2.1.8図 STB-A1試験片形状 (JIS Z 2345)

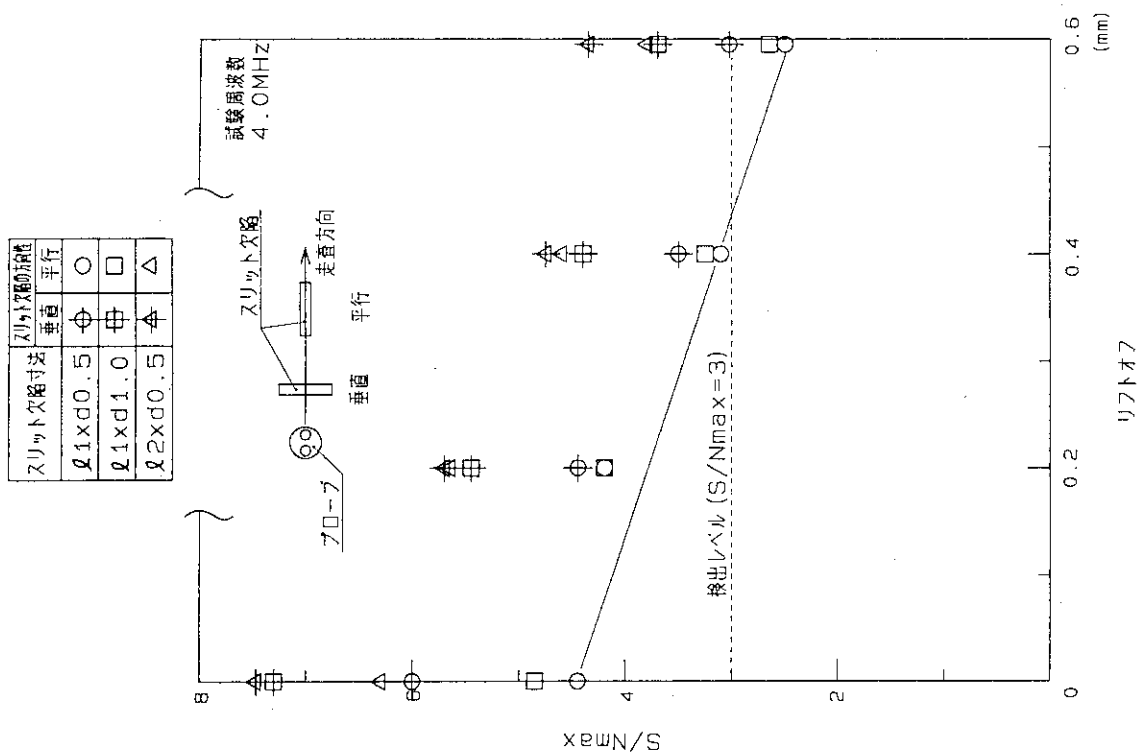
第2.1.7図 リフトオフとノイズ信号出力の関係



第2.1.9図 最大ノイズ信号出力 (Nmax) 5%を得るために必要なSTB-A1試験片感度と位相角補正值のリフトオフに対する関係

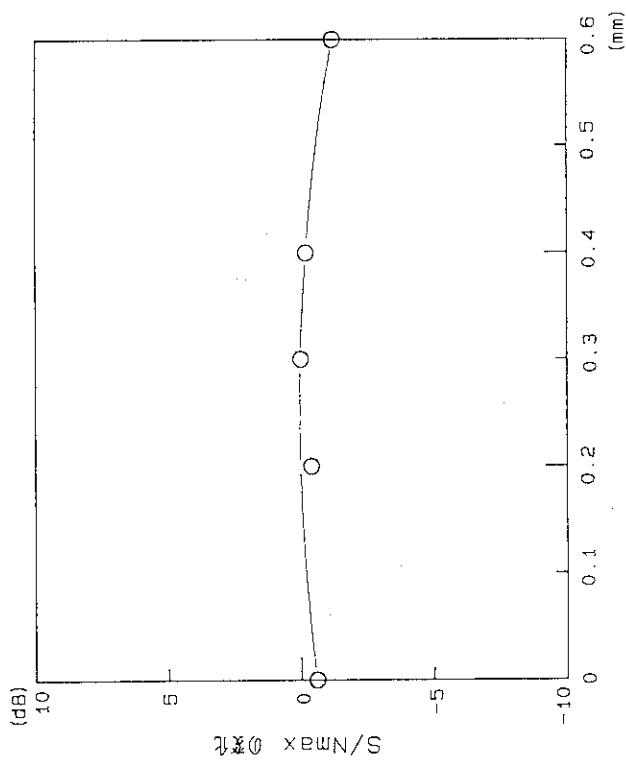
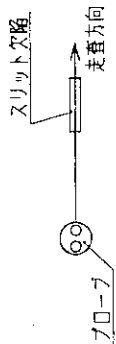


第2.1.10図 位相角と欠陥の検出性



第2.1.12図 リフトオフと欠陥の検出性の関係

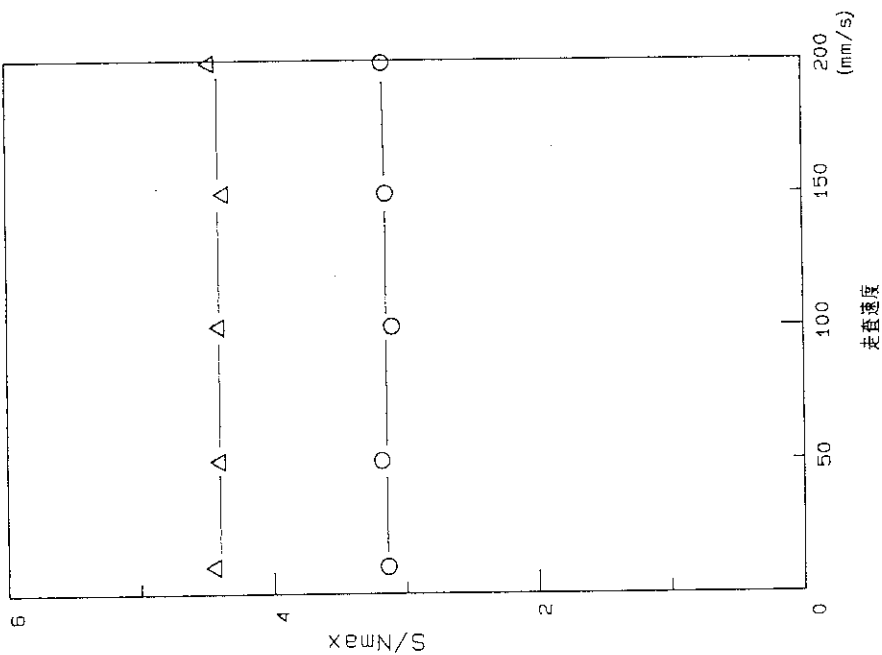
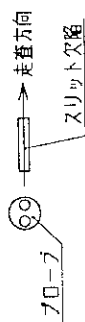
試験周波数: 4.0MHz
 位相角: STB-A1試験片位相角に対し -82° 補正
 (リフトオフ0.3mmの位相補正角に相当)
 スリット欠陥: 長さ $\phi 1 \times$ 深さ $d 0.5$



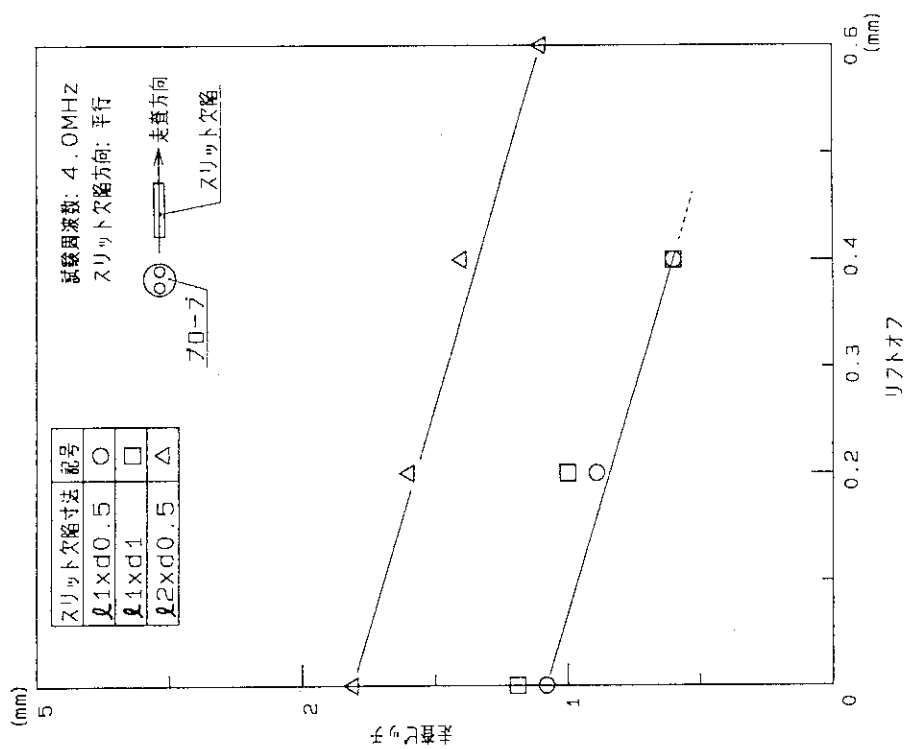
第2.1.11図 同一位相角でリフトオフを変化させた場合のS/Nmaxの変化

スリット欠陥
 ○: $\phi 1 \times d 1$
 △: $\phi 2 \times d 0.5$

試験周波数: 4.0MHz
 欠陥の方向: 平行
 リフトオフ: 0.4mm



第2.1.13図 走査速度と欠陥の検出性

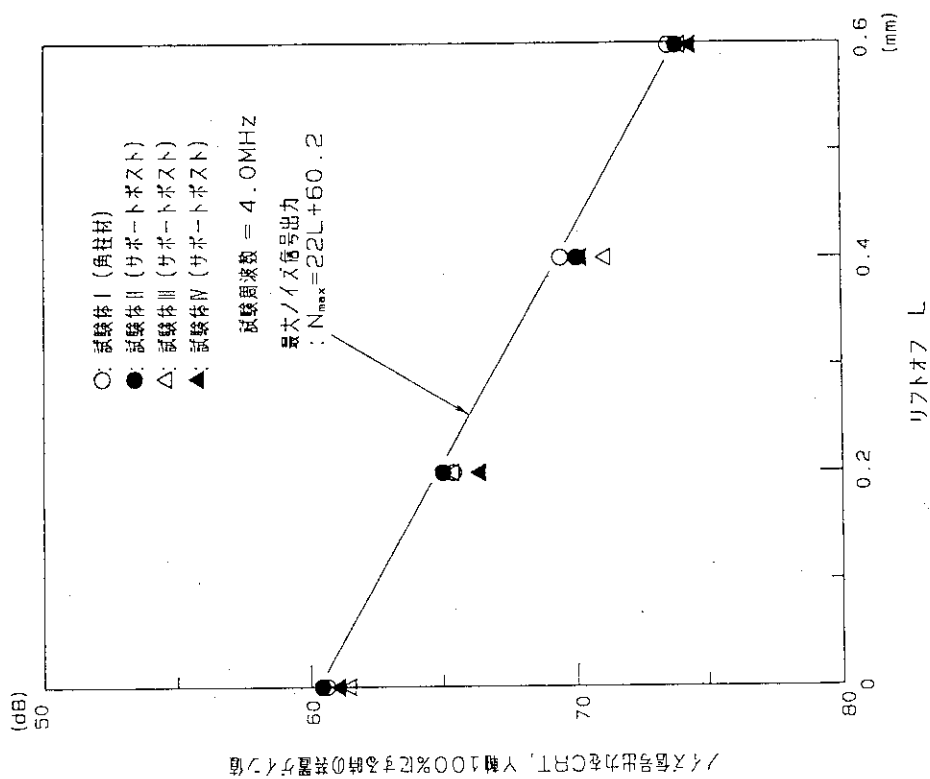


スリット欠陥寸法	記号
$\phi 1 \times d 0.5$	○
$\phi 1 \times d 1$	□
$\phi 2 \times d 0.5$	△

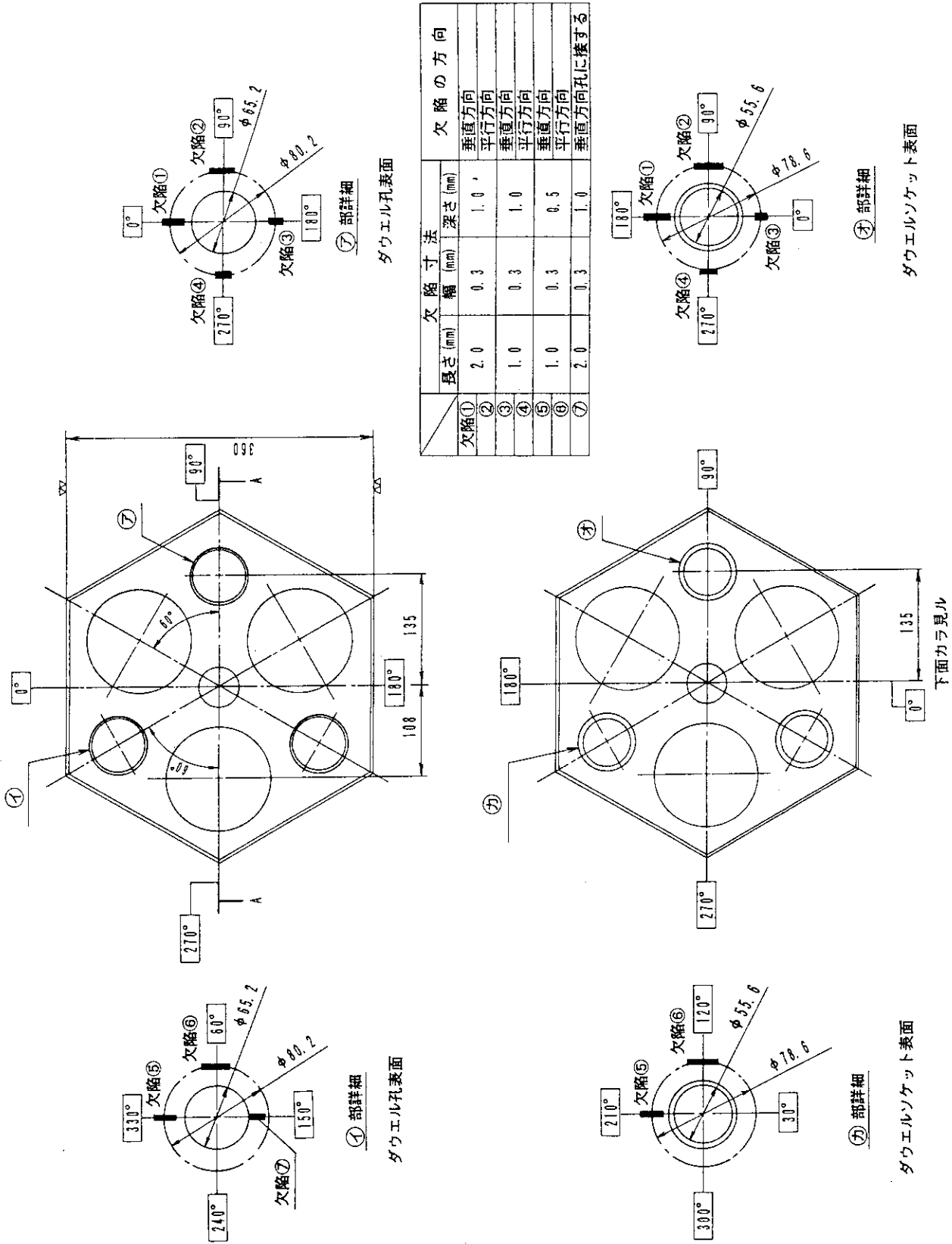
試験周波数: 4.0MHz
 スリット欠陥方向: 平行



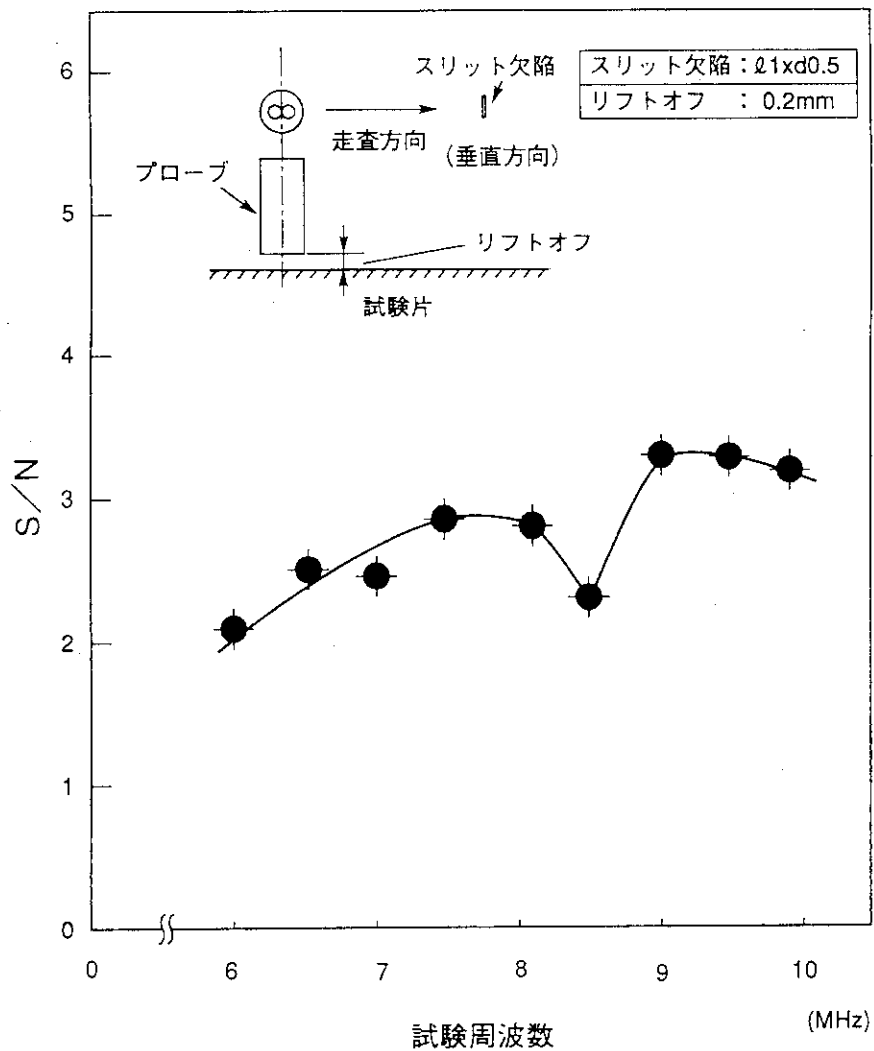
第2.1.14図 $S/N_{max} = 3$ における走査ピッチとリフトオフの関係



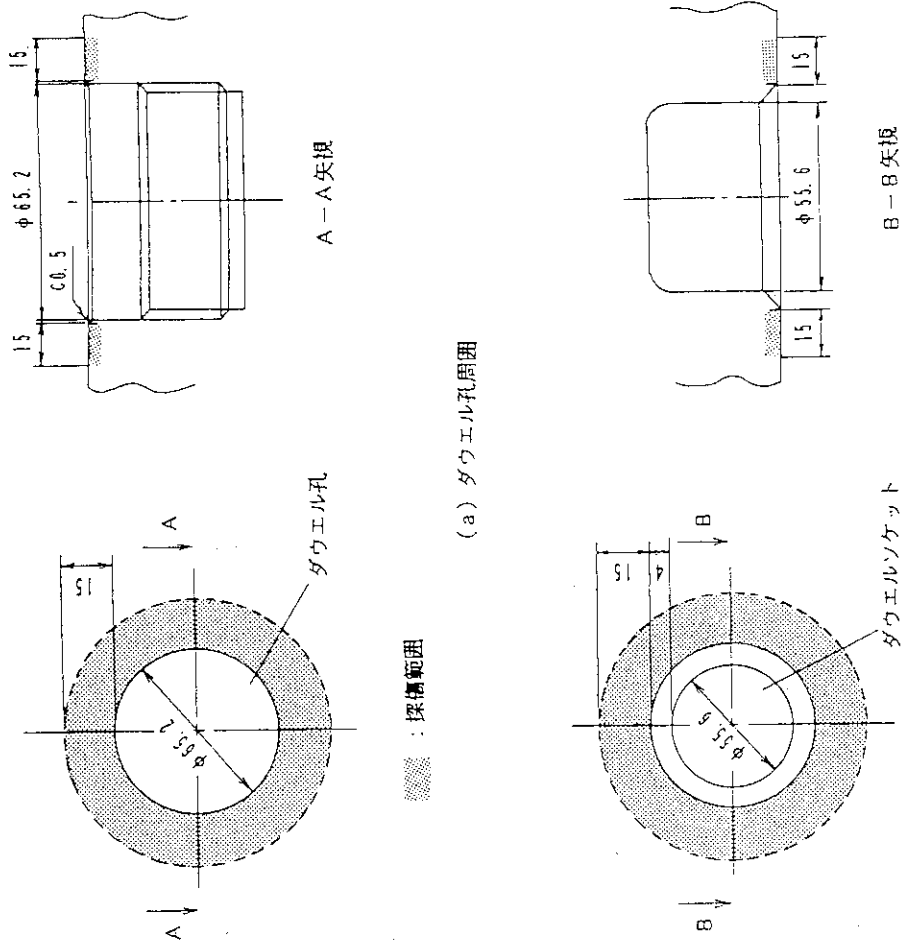
第2.1.15図 リフトオフとノイズ信号出力の関係



第2.2.1 図 制御棒案内ブロック用試験体

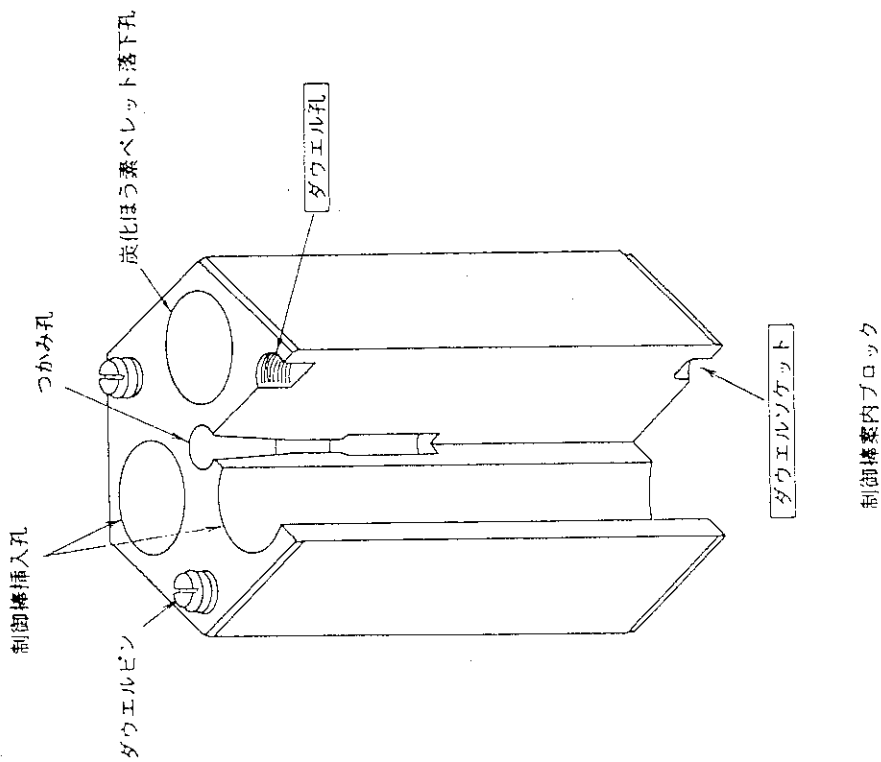


第2.2.2図 試験周波数と欠陥の検出性

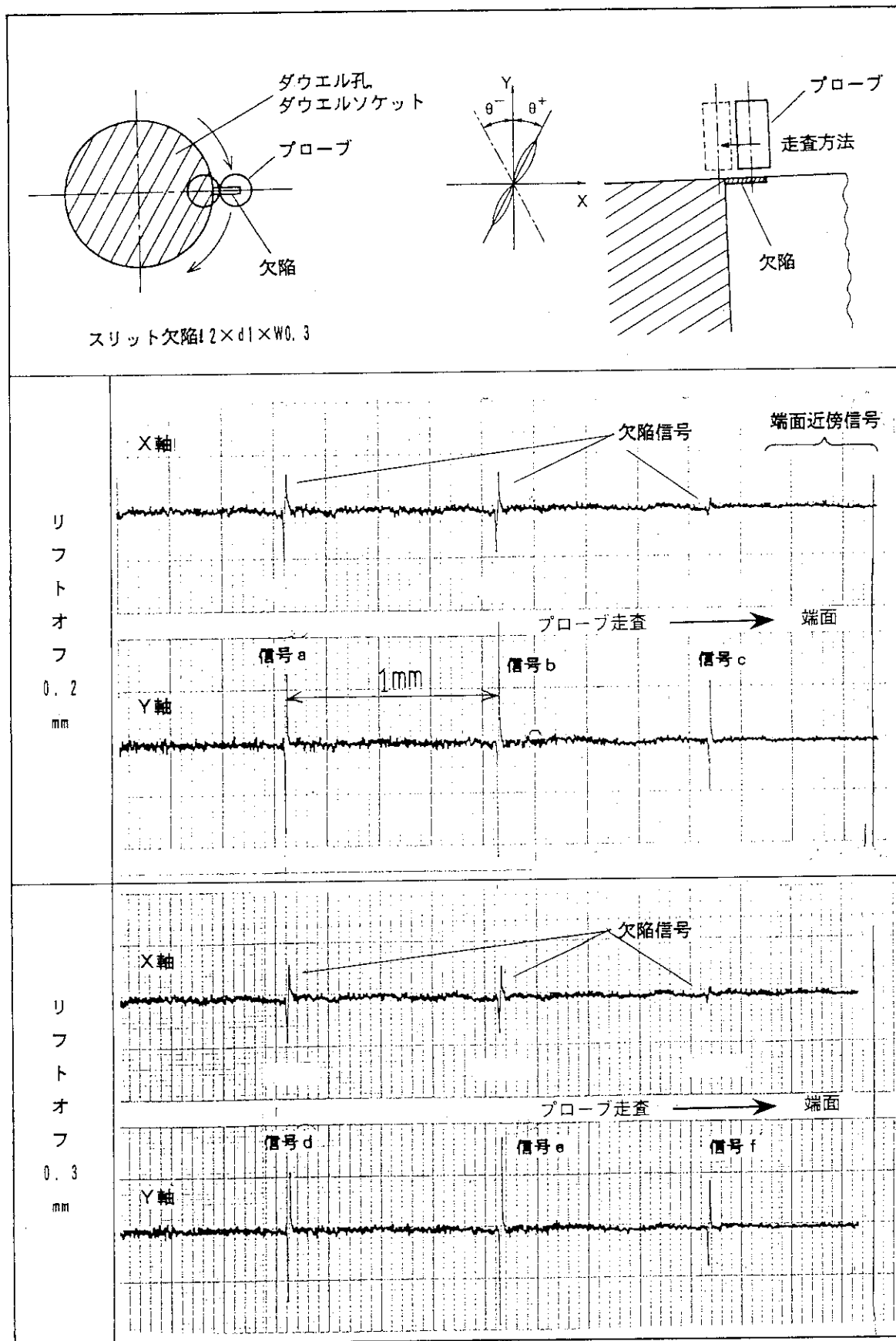


(a) ダウエル孔周囲

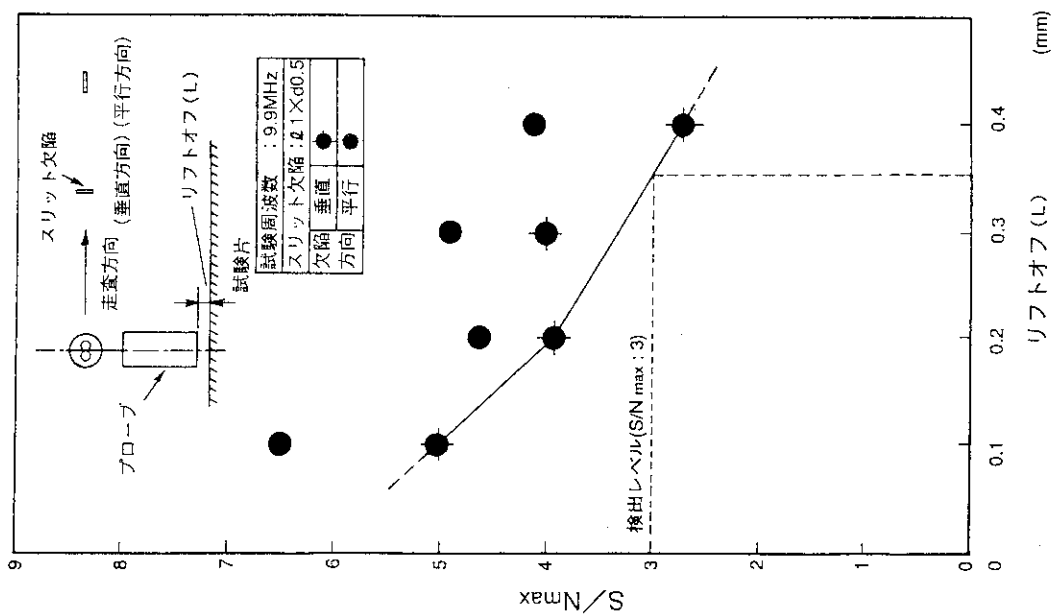
(b) ダウエルソケット周囲



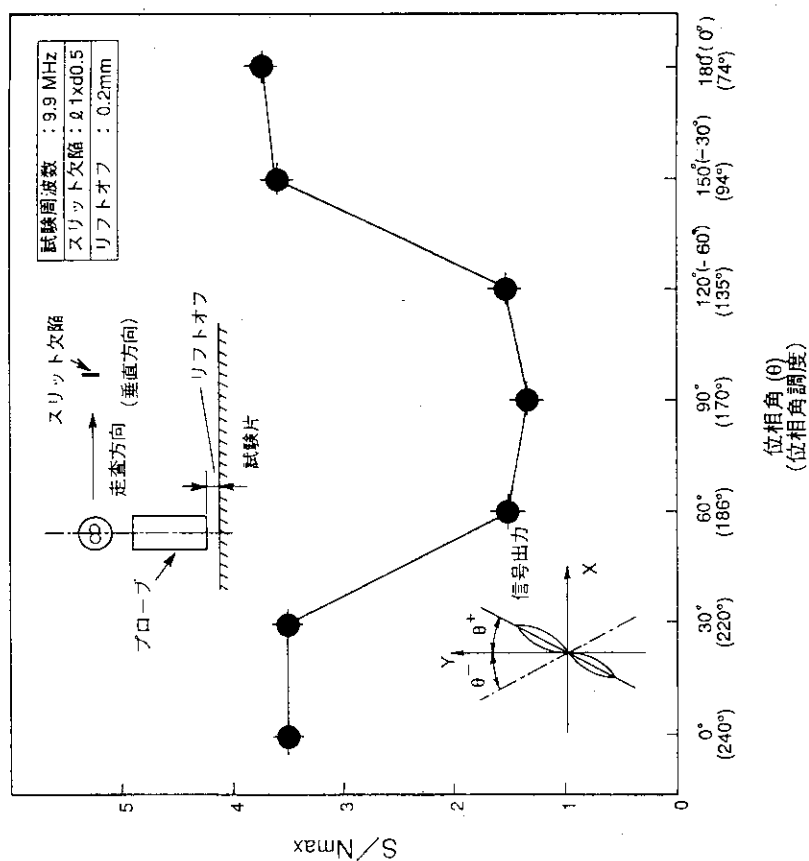
第2.2.3 図 制御棒案内ブロックの探傷範囲



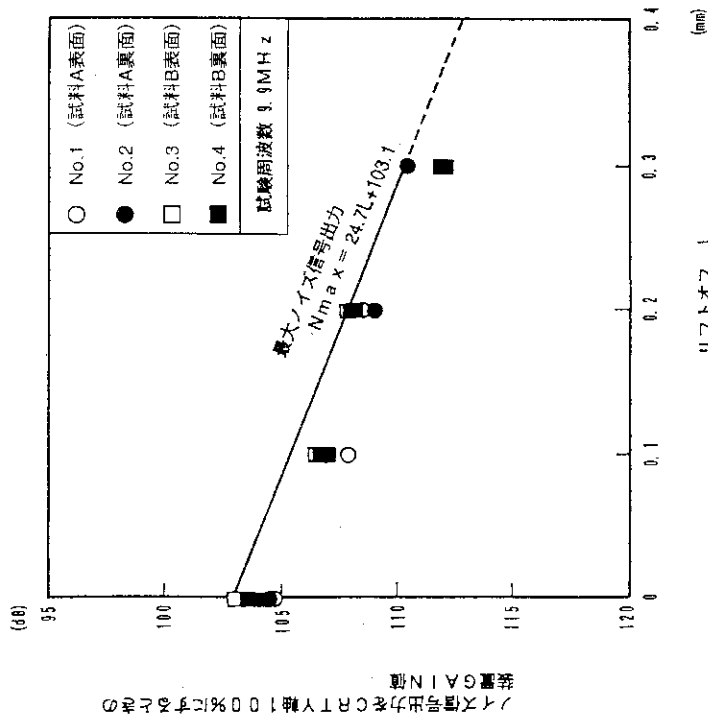
第2.2.4図 端面の影響



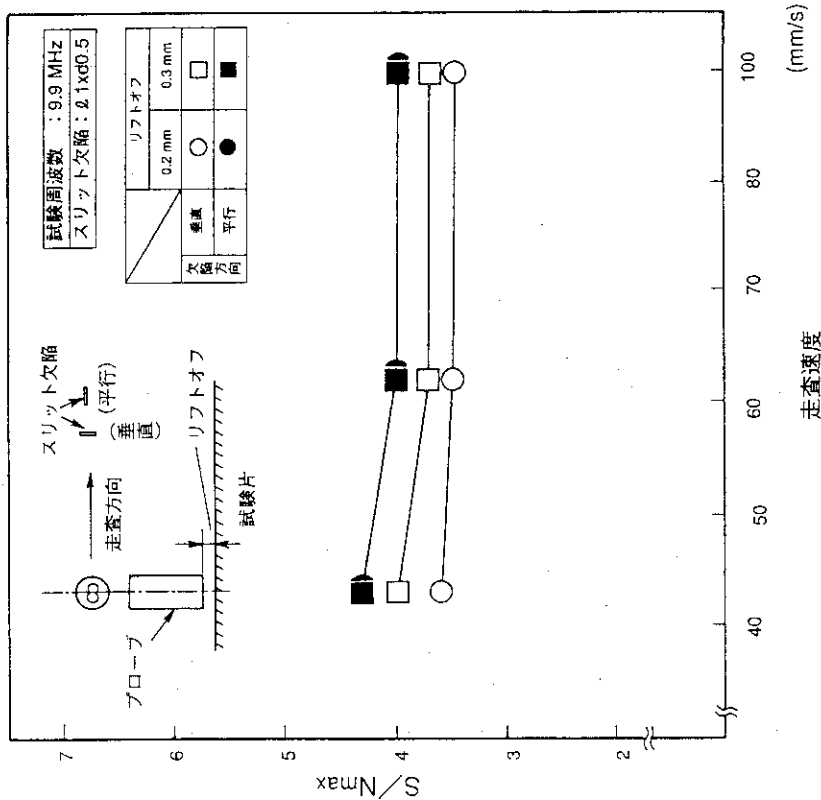
第2.2.6 図 リフトオフと欠陥の検出性



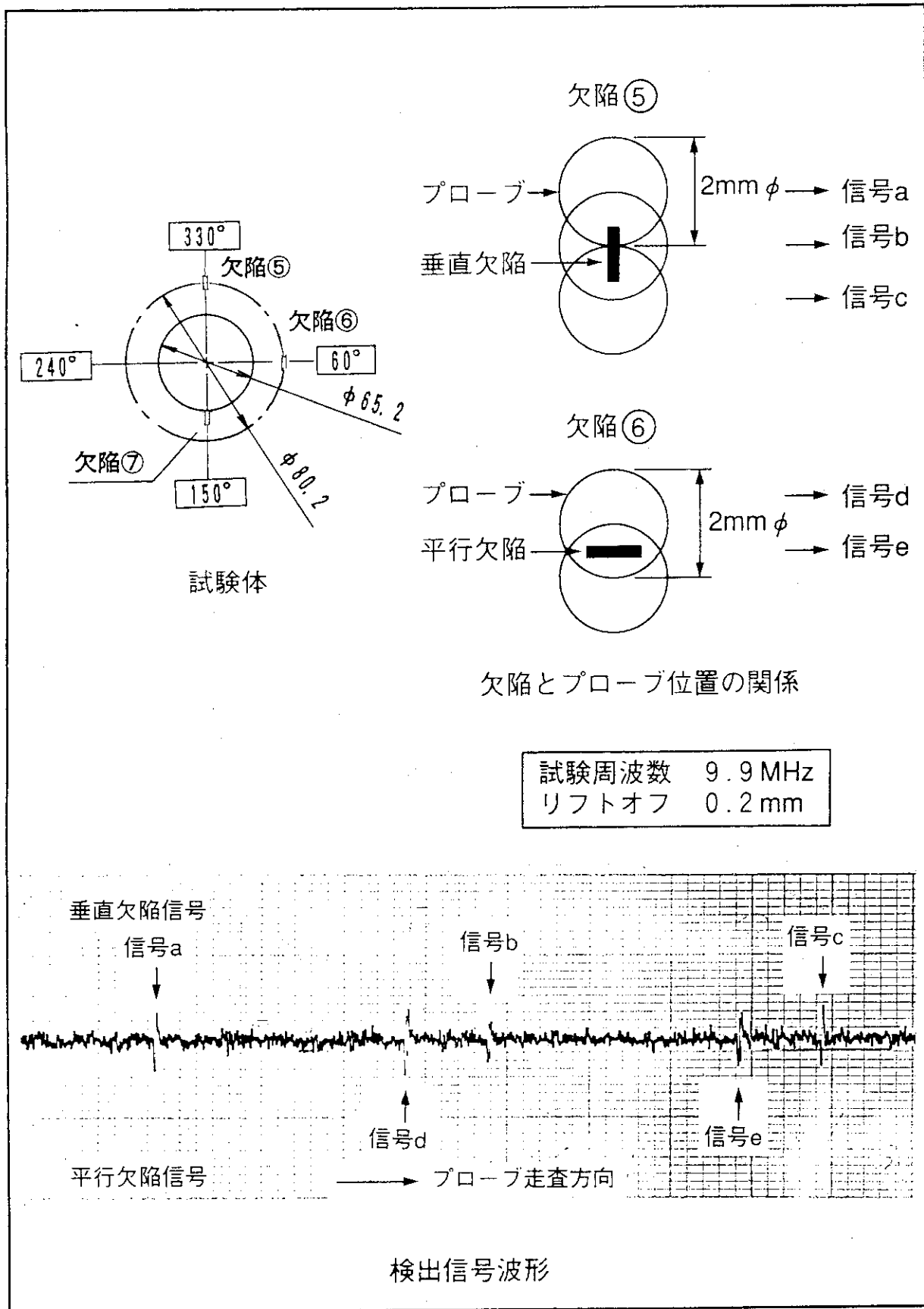
第2.2.5 図 位相角と欠陥の検出性



第2.2.9 図 リフトオフとノイズ信号出力の関係



第2.2.7 図 行走速度と欠陥の検出性

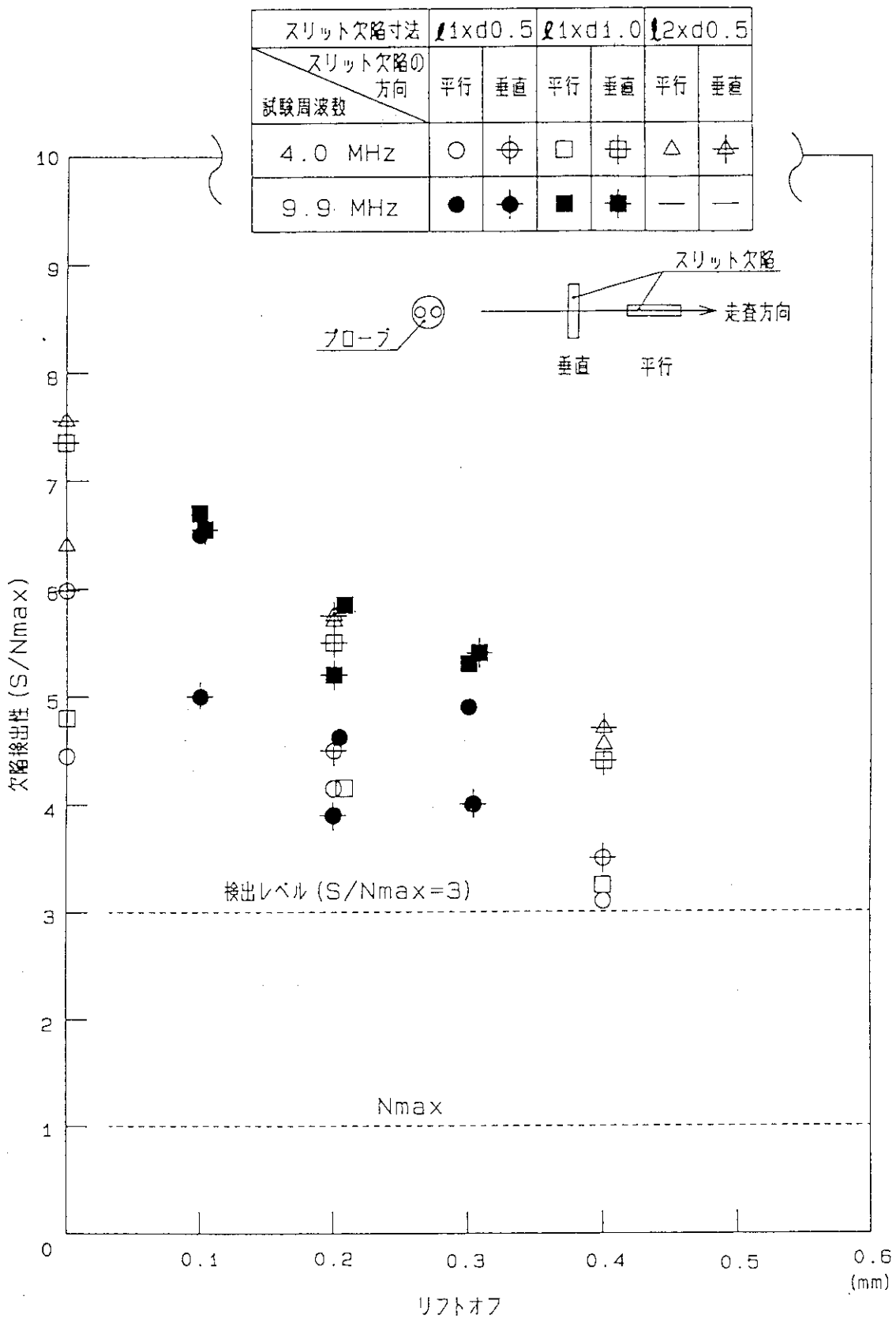


第2.2.8図 欠陥検出信号の波形例

3. 欠陥の検出性

第2.1.2図から第2.1.4図及び第2.2.1図に示した試験体に設けた $\varnothing 1\text{mm} \times d0.5\text{mm}$ 、 $\varnothing 1\text{mm} \times d1\text{mm}$ 及び $\varnothing 2\text{mm} \times d0.5\text{mm}$ の各々のスリット欠陥に対する欠陥の検出性を調べた。この結果を第3.1図に示す。ここで、縦軸は欠陥の検出性を表す欠陥信号出力(S)と最大ノイズ信号出力(Nmax)の比(S/Nmax)を示す。

サポートポスト及びポストシートについては、ディフェクトスコープ渦流探傷器(フェルスタ社製、型式;SD2.832)及び自己誘導・自己比較型のマイクロプローブを使用し、試験周波数4.0MHz、リフトオフ0mmから0.4mm、走査速度200mm/s以下で調べた。一方、制御棒案内ブロックについては、ディフェクトスコープ渦流探傷器(フェルスタ社製、型式;AF2.833)及び相互誘導・自己比較型のマイクロプローブを使用し、試験周波数9.9MHz、リフトオフ0mmから0.3mm、走査速度100mm/s以下で調べた。同図より、サポートポスト、ポストシート及び制御棒案内ブロックの場合とも付録に示した渦流探傷試験の方法に基づけば、上記の欠陥は全てS/Nmaxが3以上で検出可能なことがわかる。



第3.1図 欠陥の検出性

4. おわりに

多孔質材料の黒鉛材料は金属材料と特性が異なるため、多くの実績がある鋼構造物の渦流探傷試験をそのまま黒鉛構造物に適用できない。このため、IG-110黒鉛製の制御棒案内ブロック及びサポートポストの製品に対して行う渦流探傷試験の方法及び条件を明確にした。検討に際しては、実機の探傷部位を模擬した試験体を用いた各種条件下の渦流探傷試験を実施した。その結果を評価・検討することでIG-110黒鉛製の構造物に対する渦流探傷試験の方法及び条件を策定した。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部飛岡利明部長及び田中利幸次長並びに関係各位に深謝いたします。

参考文献

- (1) 高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針、JAERI-M 89-006(1989)
- (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(1991)
- (3) 大岡紀一、伊与久達夫、石原正博、多喜川昇、塩沢周策、神戸護、三木俊也、緒方隆晶、河江秀俊:HTTRの黒鉛受入検査における超音波探傷試験、JAERI-M 93-003(1993)
- (4) T. IYOKU, S. SHIOZAWA, N. OOKA, M. KAMBE, A. IDE: Ultrasonic and Eddy Current Testing of Nuclear Graphite, Trans. 11th SMIRT Conf., Vol. G1, G15/3(1991)
- (5) 財団法人 原子力安全研究協会:黒鉛検査基準の検討、1988(私信)

4. おわりに

多孔質材料の黒鉛材料は金属材料と特性が異なるため、多くの実績がある鋼構造物の渦流探傷試験をそのまま黒鉛構造物に適用できない。このため、IG-110黒鉛製の制御棒案内ブロック及びサポートポストの製品に対して行う渦流探傷試験の方法及び条件を明確にした。検討に際しては、実機の探傷部位を模擬した試験体を用いた各種条件下の渦流探傷試験を実施した。その結果を評価・検討することでIG-110黒鉛製の構造物に対する渦流探傷試験の方法及び条件を策定した。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部飛岡利明部長及び田中利幸次長並びに関係各位に深謝いたします。

参考文献

- (1) 高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針、JAERI-M 89-006(1989)
- (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(1991)
- (3) 大岡紀一、伊与久達夫、石原正博、多喜川昇、塩沢周策、神戸護、三木俊也、緒方隆晶、河江秀俊:HTTRの黒鉛受入検査における超音波探傷試験、JAERI-M 93-003(1993)
- (4) T. IYOKU, S. SHIOZAWA, N. OOKA, M. KAMBE, A. IDE: Ultrasonic and Eddy Current Testing of Nuclear Graphite, Trans. 11th SMIRT Conf., Vol. G1, G15/3(1991)
- (5) 財団法人 原子力安全研究協会:黒鉛検査基準の検討、1988(私信)

4. おわりに

多孔質材料の黒鉛材料は金属材料と特性が異なるため、多くの実績がある鋼構造物の渦流探傷試験をそのまま黒鉛構造物に適用できない。このため、IG-110黒鉛製の制御棒案内ブロック及びサポートポストの製品に対して行う渦流探傷試験の方法及び条件を明確にした。検討に際しては、実機の探傷部位を模擬した試験体を用いた各種条件下の渦流探傷試験を実施した。その結果を評価・検討することでIG-110黒鉛製の構造物に対する渦流探傷試験の方法及び条件を策定した。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部飛岡利明部長及び田中利幸次長並びに関係各位に深謝いたします。

参考文献

- (1) 高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針、JAERI-M 89-006(1989)
- (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(1991)
- (3) 大岡紀一、伊与久達夫、石原正博、多喜川昇、塩沢周策、神戸護、三木俊也、緒方隆晶、河江秀俊:HTTRの黒鉛受入検査における超音波探傷試験、JAERI-M 93-003(1993)
- (4) T. IYOKU, S. SHIOZAWA, N. OOKA, M. KAMBE, A. IDE: Ultrasonic and Eddy Current Testing of Nuclear Graphite, Trans. 11th SMIRT Conf., Vol. G1, G15/3(1991)
- (5) 財団法人 原子力安全研究協会:黒鉛検査基準の検討、1988(私信)

付録 I G - 1 1 0 黒鉛構造物の 渦流探傷試験方法

本検討結果に基づいて、HTTRのIG-110黒鉛構造物の受入検査における非破壊検査(渦流探傷試験)の方法を以下のとおり策定した。

1. 対象機器

HTTRに使用するIG-110黒鉛の渦流探傷試験は、炉内構造物のサポートポスト及びポストシート並びに炉心構成要素の制御棒案内ブロックについて行う。渦流探傷試験の対象製品の試験対象部位を下表に示す。

設備名	対象機器	製品数	対象部位	材料名
炉内構造物	サポートポスト	21体	サポートポストとポストシートの接触部	IG-110
	ポストシート	42体		
炉心構成要素	制御棒案内ブロック	144体	ブロック上面のダウエル孔周囲及び ブロック下面のダウエルソケット周囲	黒鉛

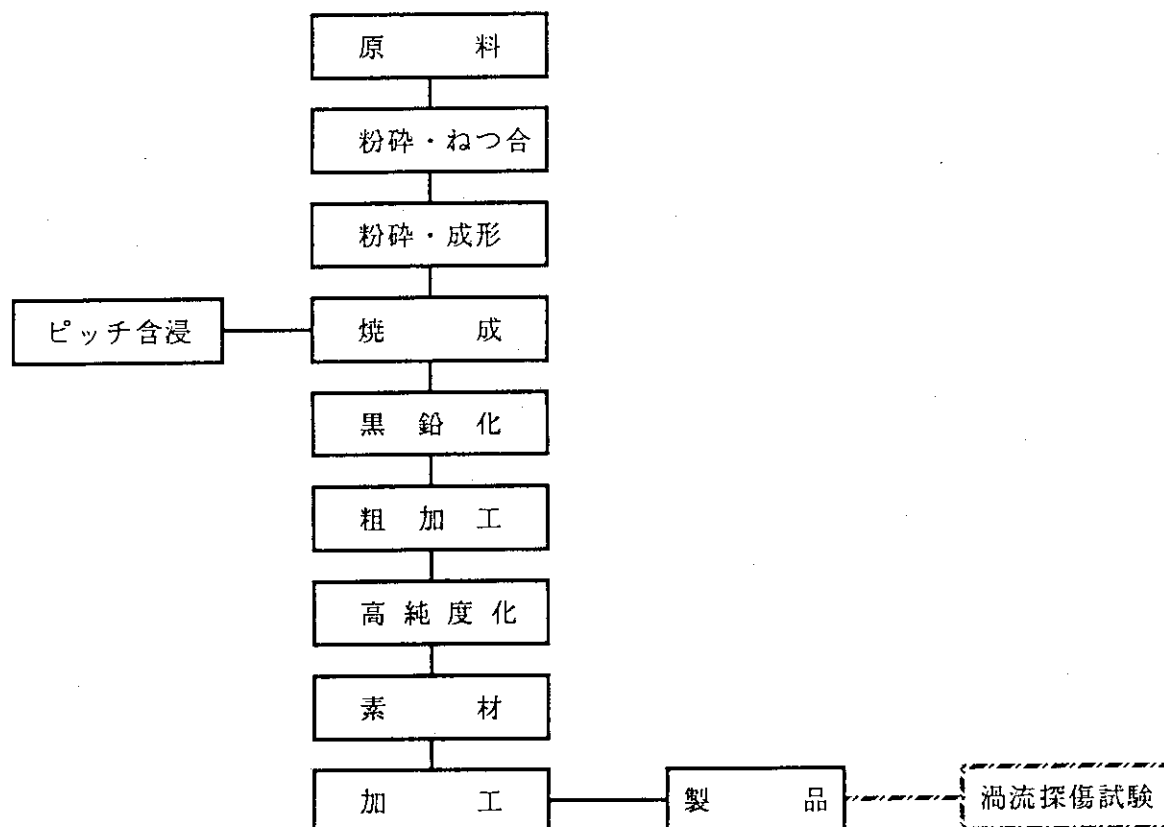
2. 関連規格及び基準

本渦流探傷試験を行うにあたって、下記の規格及び基準等を適用する。

- (1) 「高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針」 JAERI-M 89-006(1989)
- (2) 「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針の解説」 JAERI-M 91-083(1991)
- (3) 「高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計方針の解説」 JAERI-M 91-070(1991)
- (4) 「高温工学試験研究炉の黒鉛検査基準」 JAERI-M 91-102(1991)
- (5) JIS Z 2345(1987) 「超音波探傷用標準試験片」

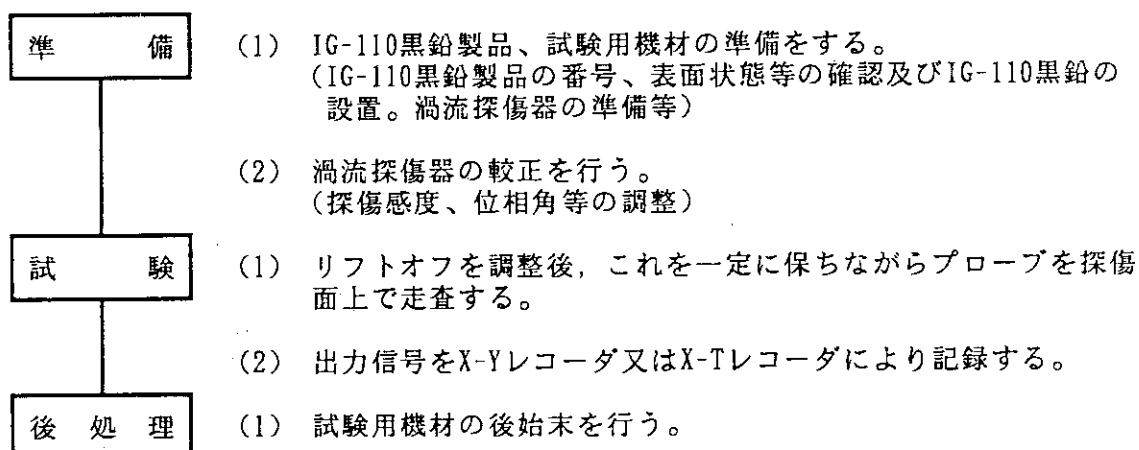
3. 試験時期

渦流探傷試験は、以下に示すIG-110黒鉛の原料から製品までの製造工程において、工場での試験対象部位の最終加工終了後に実施する。



4. 試験手順

渦流探傷試験の手順を下記に示す。



5. 試験実施要領

渦流探傷試験は、対象とするIG-110黒鉛製品の探傷面に対し、原則として探傷部位の形状に応じたスキャナヘッドを備えた自動探傷装置により実施する。その試験実施要領を以下に示す。

5.1 試験装置

(1) 渦流探傷器

原則として、下記のポータブル型渦流探傷器又はそれと同等の性能を有するものを使用する。

① サポートポスト及びポストシート

名 称	型 式	試験周波数範囲	メ ー カ
ディフェクト スコープ	SD 2.832	100Hz～9.9MHz	フェルスタ

② 制御棒案内ブロック

名 称	型 式	試験周波数範囲	メ ー カ
ディフェクト スコープ	AF 2.833	100Hz～9.9MHz	フェルスタ

(2) プローブ

原則として、下記のプローブ又はそれと同等の性能を有するものを使用する。

① サポートポスト及びポストシート

名 称	型 式	試験周波数	メ ー カ
マイクロプローブ	自己誘導・自己比較型	4.0 MHz	ユニ電子

② 制御棒案内ブロック

名 称	型 式	試験周波数	メ ー カ
マイクロプローブ	相互誘導・自己比較型	9.9 MHz	フェルスタ

(3) 渦流探傷装置の概要

① サポートポスト及びポストシート

渦流探傷装置は、プローブ、プローブの走査を行うスキャナ及び対象製品を保持し、回転位置決めするローラ(サポートポスト用)又はターンテーブル(ポストシート用)等から構成される。

付図A.1にサポートポスト及びポストシートのスキャナ概念図を示す。スキャナは、プローブを固定支持し、周方向及び径方向の走査により探傷を行う。探傷中に安定した信号を得るために、リフトオフを一定に保ち自動的に探傷できる構造となっている。

② 制御棒案内ブロック

付図A.2にダウエル孔周囲及びダウエルソケット周囲のスキャナ概念図を示す。スキャナは、小型であるためIG-110黒鉛製品の上に設置した状態で使用可能で、また、各スキャナには、それぞれ上記プローブが取り付けられ、探傷中に安定した信号出力を得るために、リフトオフを一定に保ち自動的に探傷できる構造となっている。

5.2 対比試験片

対比試験片としてSTB-A1試験片を用いる。

5.3 探傷方法

(1) 探傷面の状態

探傷面の表面状態は、清浄でかつ滑らかであること。

(2) 探傷範囲

① サポートポスト

探傷は、付図A.3(a)に示す斜線部(サポートポストの両端の球面部)を探傷範囲とする。

② ポストシート

探傷は、付図A.3(b)に示す斜線部(ポストシートの球面部)を探傷範囲とする。

③ ブロック上面ダウエル孔周囲

探傷は、付図A.4(a)に示す制御棒案内ブロック上面ダウエル孔の孔周り15mmの範囲を探傷範囲とする。

④ ブロック下面ダウエルソケット周囲

探傷は、付図A.4(b)に示す制御棒案内ブロック下面ダウエルソケット周り15mmの範囲を探傷範囲とする。

(3) 渦流探傷装置の調整

① 探傷感度の調整

探傷感度は、STB-A1試験片の0.5mm幅スリットを用いて調整する。

(a) サポートポスト及びポストシート

探傷感度は、STB-A1試験片の0.5mm幅スリットをリフトオフ0mmで探傷し、信号出力の最

大がCRT、Y軸と一致するように位相を調節し、かつ、信号出力がCRT、Y軸100%になるように調整した後、探傷時のリフトオフが0.2mmの場合は18dB、0.3mmの場合は20dB及び0.4mmの場合は22dB感度を高める。

(b) 制御棒案内ブロック

探傷感度は、STB-A1試験片の0.5mm幅スリットをリフトオフ0mmで探傷し、信号出力の最大がCRT、Y軸と一致するように位相を調節し、かつ、信号出力がCRT、Y軸100%になるように調整した後、探傷時のリフトオフが0.2mmの場合は5dB及び0.3mmの場合は6dB感度を高める。

② 位相角調整

位相角は、IG-110黒鉛で得られる欠陥の検出性(S/Nmax、S:欠陥信号出力、Nmax:最大ノイズ信号出力)が最大となるように、STB-A1試験片の0.5mm幅スリットを探傷して得られる信号出力の位相角を用いて調整する。

(a) サポートポスト及びポストシート

①の(a)により探傷感度を調整した後、探傷器の位相角調度を -82° 補正する。

(b) 制御棒案内ブロック

①の(b)により探傷感度を調整した後、探傷器の位相角調度を -30° 補正する。

③ 検出レベル

検出レベルは、IG-110黒鉛のNmaxとSとの比が(S/Nmax=3)となるように、Nmaxに対して、3倍高いレベルとする。

(4) プローブの走査方法

プローブの走査は、原則として渦流探傷試験装置を利用して自動走査にて、以下のとおり実施する。

① サポートポスト及びポストシート

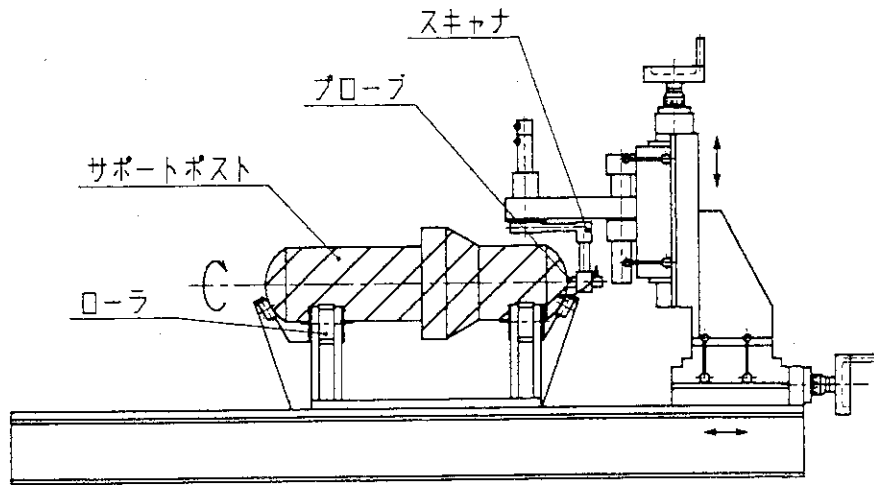
探傷面とプローブのリフトオフを、シックネスゲージ等を用いて0.2mmから0.4mmの範囲で所定の位置に調整し、付図A.5に示すようにプローブを径方向(x)に走査して、周方向(r)にピッチ送りを行う。走査速度は200mm/s以下、走査ピッチは0.6mm以下とする。

② 制御棒案内ブロック

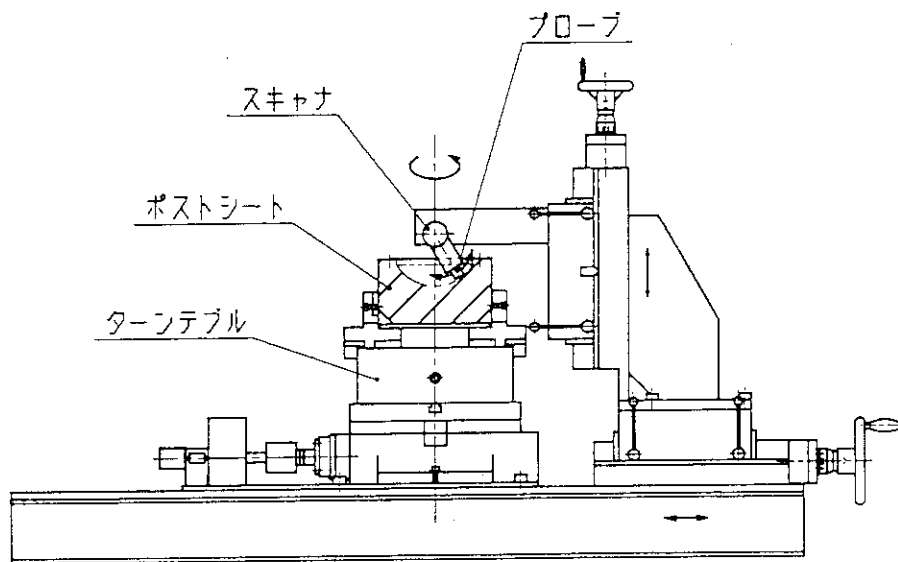
探傷面とプローブのリフトオフを、シックネスゲージ等を用いて0.2mmから0.3mmの範囲で所定の位置に調整し、付図A.6に示すようにプローブをダウエル孔及びダウエルソケットの周囲を周方向(r)に渦巻状に走査して、径方向(x)にピッチ送りを行う。走査速度は100mm/s以下、走査ピッチは1mmとする。

6. 判定基準

受入検査における渦流探傷試験の判定基準は、ノイズの高さとの比較において、有意な欠陥信号出力が無いことをいい、具体的には、検出レベル以上の欠陥信号出力(S/Nmax \geq 3)が検出されないこと。

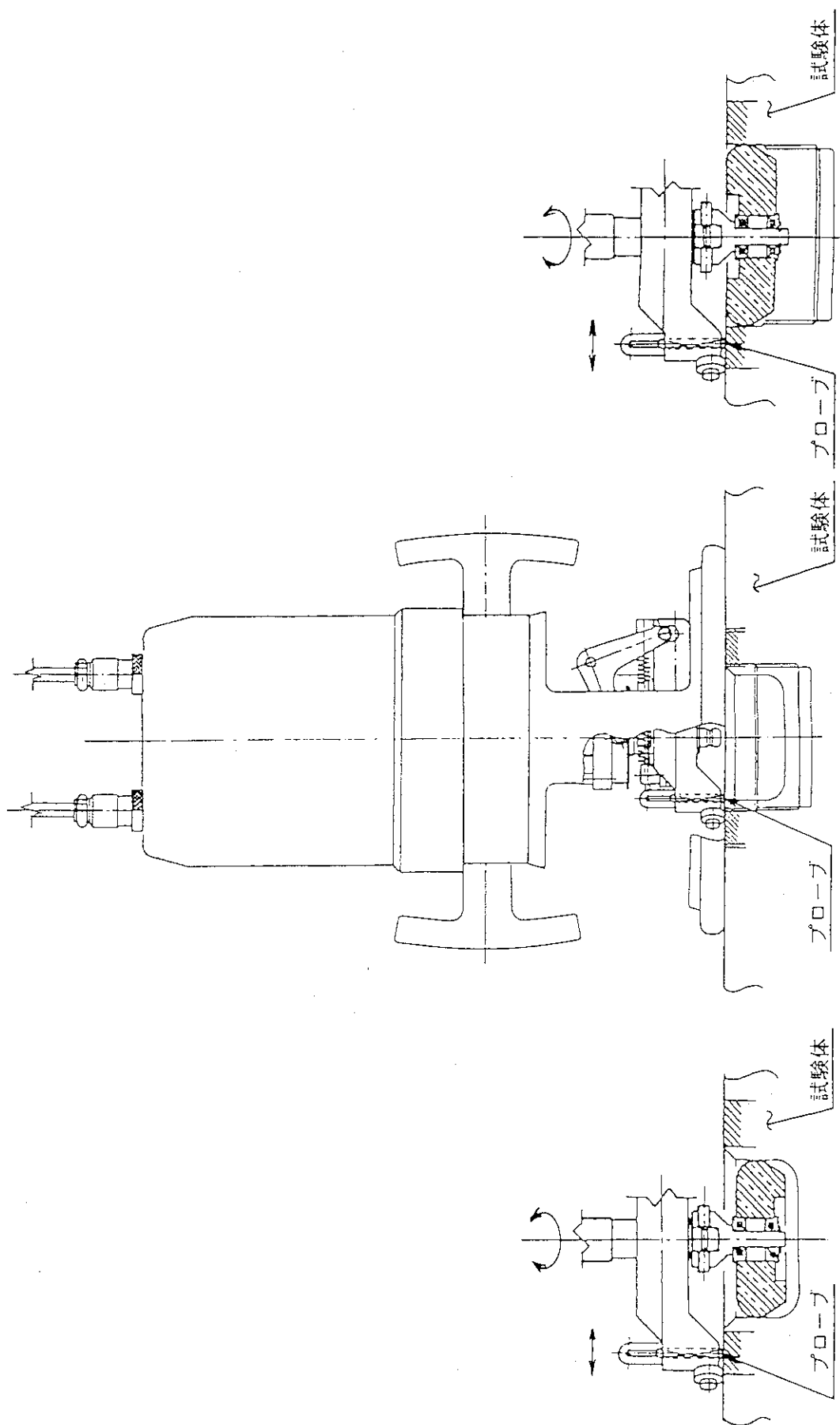


(a) サポートポスト用



(b) ポストシート用

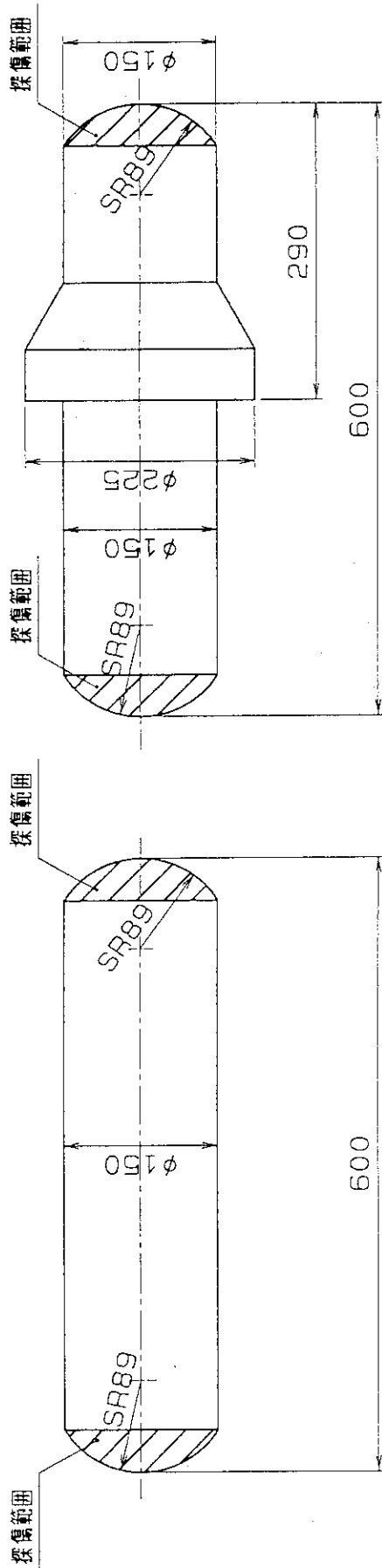
付図A. 1 サポートポスト用及びポストシート用スキャナ概念図



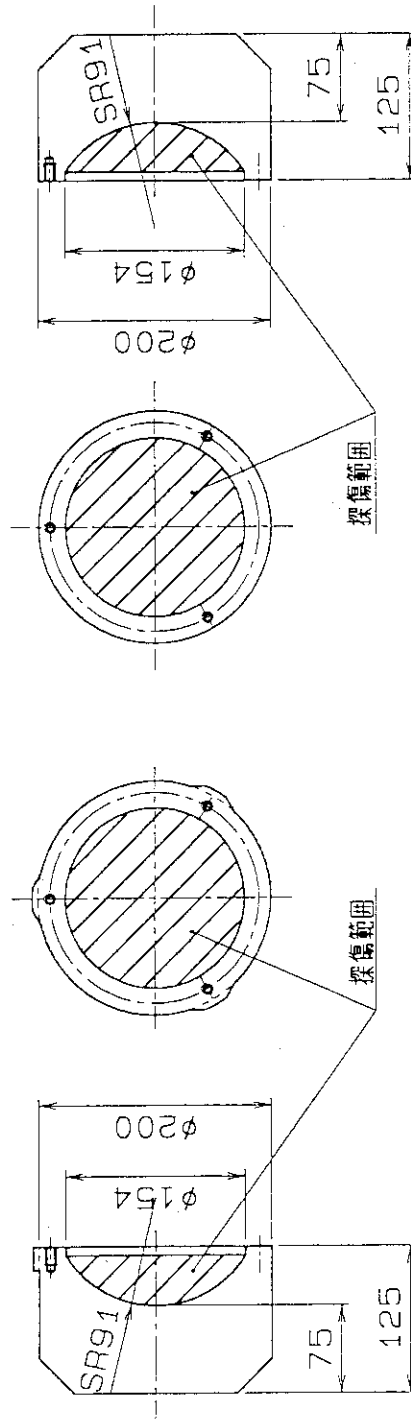
(a) ダウエルソケット周囲用

(b) ダウエル孔周囲用

付図A.2 ダウエル孔周囲及びダウエルソケット周囲用スキャナ概念図

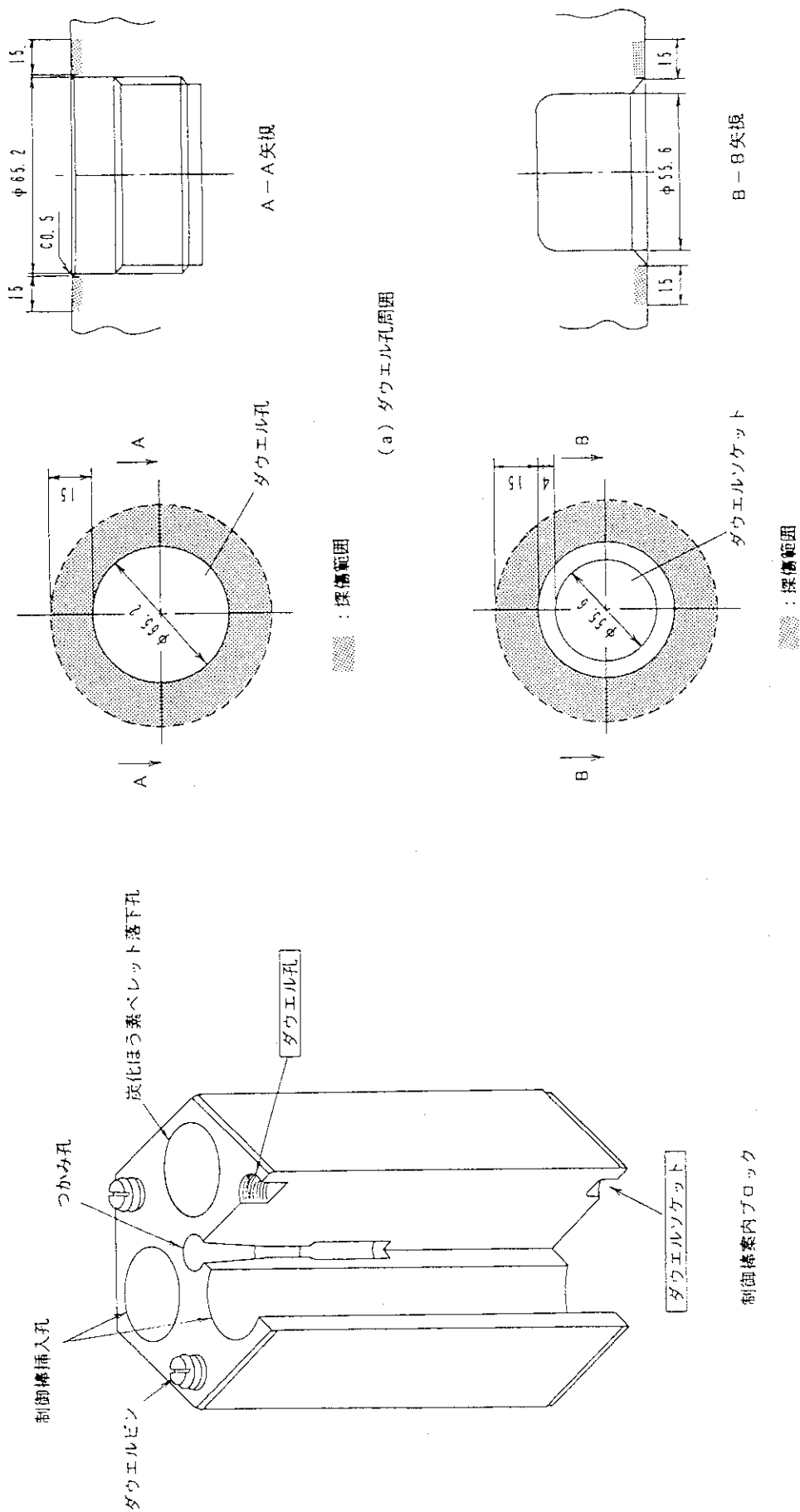


(a) サポートポスト

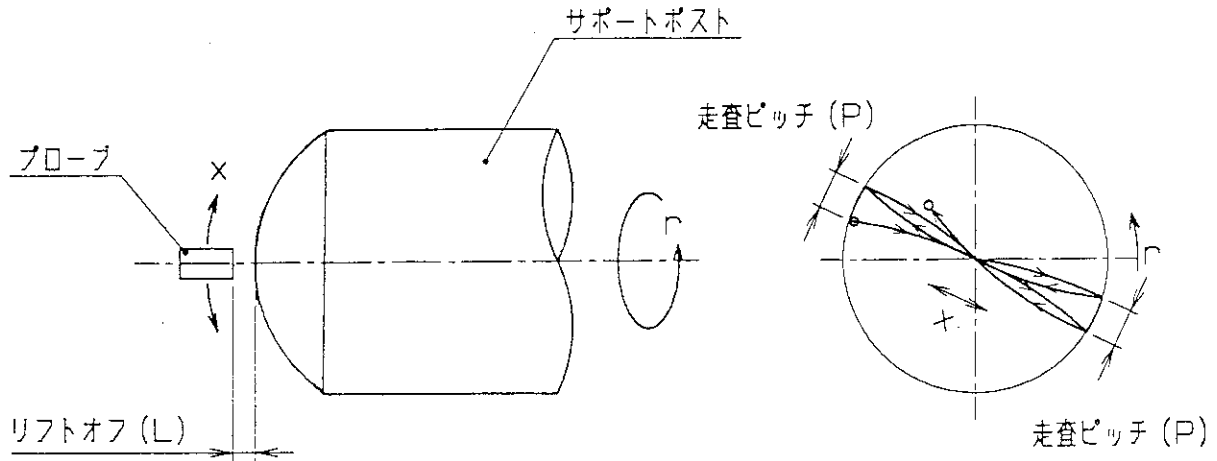


(b) ポストシート

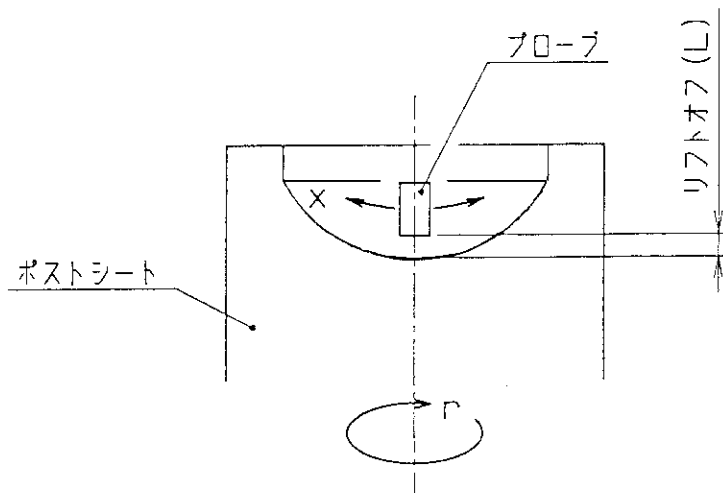
付図A.3 サポートポストとポストシートの探傷範囲



付図A.4 制御棒案内ブロックの探傷範囲

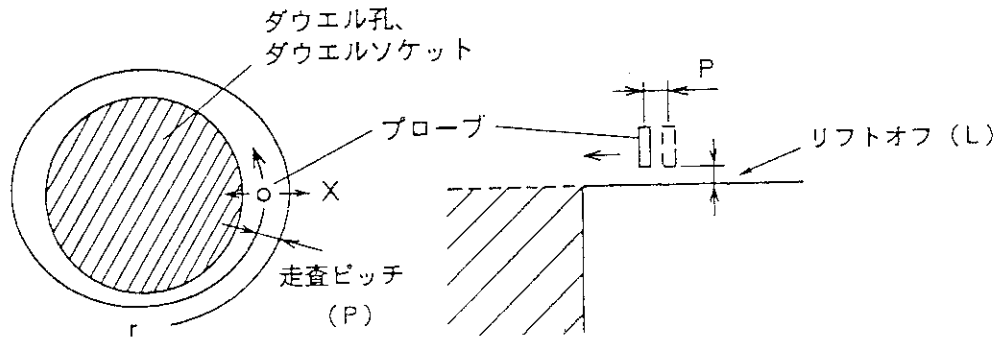


(a) サポートポスト



(b) ポストシート

付図A.5 サポートポストとポストシートのプローブ走査方法



付図A. 6 制御棒案内ブロックのプローブ走査方法