

実験計画法による高速炉燃料被覆管のシャワー エコー発生に及ぼす要因効果の評価試験

1978年2月

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

この資料は、社内における検討、周知を目的

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001



実験計画法による高速炉燃料被覆管のシャワー エコー発生に及ぼす要因効果の評価試験

実施責任者 三浦 信 (技術部 検査開発課)

報告者 佐藤 政一 (")

河野 秀作 (")

期 間 1977年1月～1978年1月

目 的 高速炉燃料被覆管の超音波探傷試験時に発生する欠陥擬似信号 (シャワーエコー) の発生要因を実験計画法によって結晶粒度, 探触子周波数, 冷間加工度, 超音波ビーム径, 探傷条件の五因子について調べ, その要因効果を定量的に解析し, あわせて最適抑止条件を見い出すことを目的とする。

要 旨 本実験では高速炉燃料被覆管の超音波探傷試験時に発生するシャワーエコーの発生原因とその最適抑止条件を定量的に評価するため, 実験計画法によって結晶粒度 (7.5, 9.0 [ASTM Grain Size Number] の2水準), 探触子周波数 (7, 10 [MHz] の2水準), 冷間加工度 (18, 20 [%] の2水準), 超音波ビーム径 (0.3, 0.5 [mm ϕ] の2水準), 探傷条件 (軸方向偏心量 1.0, 1.1, 1.2, 1.3 [mm], 周方向入射角度 20, 22, 24, 26 [deg] の各4水準) の五因子についてその要因効果, 寄与率および最適抑止条件を分散分析によって定量的に解析することを試みた。

その結果, 従来の探傷条件設定法におけるゲート位置による試験では軸方向, 周方向探傷試験とも結晶粒度, 探触子周波数, 超音波ビーム径, 探傷条件の順に要因効果が認められ, 中でも結晶粒度, 探触子周波数には危険率5%以下で有意であることが認められた。

また, 抑止条件として結晶粒度小 (9.0 ASTM), 探触子周波数低 (7 MHz), 冷間加工度大 (20%), 超音波ビーム径大 (0.5 mm ϕ), 軸方向探傷条件 (偏心量 1.1 mm), 周方向探傷条件 (入射角 24 deg) の結果が得られた。

また, 各探触子の焦点距離および表面反射エコーからのゲート距離を一定とするゲート位置による試験でも各要因の特性値に対する要因効果, 抑止条件に同様な結果が得られた。

目 次

1. ま え が き	1
2. 実験装置・試料	2
2.1 実験装置	2
2.2 試料被覆管	3
3. 実験方法	6
3.1 従来の探傷条件設定でのゲート位置による試験	7
3.2 焦点距離を一定とし表面反射エコーからのゲート距離を一定とする ゲート位置による試験（探傷感度一定）	8
3.3 焦点距離を一定とし表面反射エコーからのゲート距離を一定とする ゲート位置による試験（探傷感度変化）	8
4. 実験結果	10
4.1 従来の探傷条件設定でのゲート位置による試験結果	11
4.2 焦点距離を一定とし表面反射エコーからのゲート距離を一定とする ゲート位置による試験結果（探傷感度一定）	13
4.3 焦点距離を一定とし表面反射エコーからのゲート距離を一定とする ゲート位置による試験結果（探傷感度変化）	15
5. 考察およびまとめ	66
6. あとがき	72

1. ま え が き

現在、高速炉燃料被覆管にはクリープ破壊強度を高めるため、結晶粒を大きくしたSUS 316冷間加工材が使用されている。

しかし、この被覆管の超音波探傷試験では結晶粒の大きなことが最大原因と見られるシャワーエコーと呼ばれる欠陥擬似信号が発生し、この信号が欠陥信号に重畳してチャート上で欠陥判定ができなくなったため、この発生原因をとらえ、最適抑止条件を明確にしていくことが急がれて来た。

そこで、本実験では、この発生原因と最適抑止条件とを定量的に解析してその要因効果を評価するという目的から、結晶粒度、探触子周波数、冷間加工度、超音波ビーム径、探傷条件の五因子について、それぞれの因子がシャワーエコー発生に及ぼす要因効果、寄与率およびシャワーエコー発生に対する最適抑止条件を実験計画法による分散分析によって調べこれらを定量的に解析することを試みた。

その結果、分散分析によって各要因についてのシャワーエコー特性値に対する要因効果、寄与率、最適抑止条件等を定量的に解析し評価することが出来たので報告する。

2. 実験装置・試料

2.1 実験装置

本実験で使用した超音波探傷装置を写真 2.1 に示す。この装置は試料の両端を支持棒を介してチャックではさみ、片端を回転、片端を自由支持し、写真 2.1 に見える探触子の取り付けられた水槽全体を軸方向に送ることにより自動探傷するものである。

なお、試料は水槽内に取り付けられたローラで押さえられ振れを小さくしている。

使用した装置は次のとおりである。

(1) 超音波探傷装置

PNC 自作

(試料部分浸漬 定位置回転 探触子・水槽移動)

試料回転数 990 [rpm]

探触子・水槽移動速度 176 [mm/min]

測定可能試料寸法 { 径 6.5 [mm]
長さ 4000 [mm]

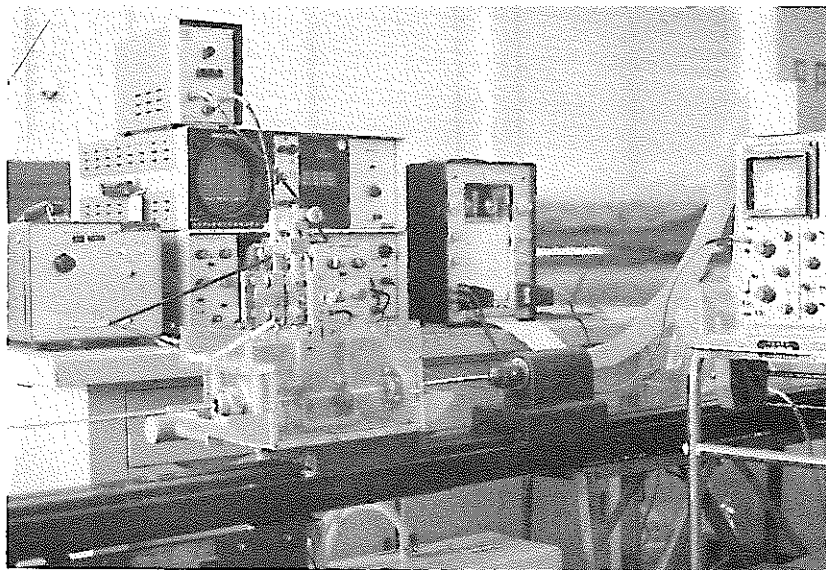


写真 2.1

- (2) 探傷器 UM-721型 東京計器製
- (3) 減衰器 UAT-11H型 東京計器製
 - 減衰量 0~50 [dB] (0.5 dB 単位で可変)
 - 応答周波数 0.4~10 [MHz]
- (4) 記録計 2チャンネル BRUSH社製
 - チャート速度 1~125 [mm/sec]
- (5) 探触子 NORTEC社製
 - ポイントフォーカス型 (ジルコン酸・チタン酸鉛)
 - 探触子周波数 10 [MHz], 7 [MHz]
 - 超音波ビーム径 0.5 [mm ϕ] 0.3 [mm ϕ]
- (6) シンクロスコープ SS-5157型 岩崎通信機製
- (7) 金属組織定量解析装置 (画像解析装置) BAUSCH & LOMB製
Omnicon Image Analysis System

2.2 試料被覆管

STB 被覆管寸法	外径 6.5 [mm] 内径 5.6 [mm]
	肉厚 0.45 [mm] 長さ 600 [mm]
供試料被覆管寸法	外径 6.5 [mm] 内径 5.6 [mm]
	肉厚 0.45 [mm] 長さ 500 [mm]

供試料, 人工欠陥つき標準試料 (以下STBという) とともに「もんじゅ」炉心用燃料被覆管で材質はオーステナイト系ステンレス鋼SUS 316である。

表 2.1 ~ 表 2.4 に供試料被覆管の化学成分, 結晶粒度, 加工度を示す。

表 2.1 供試料(1)の化学成分, 結晶粒度, 加工度

化 学 成 分 %																	結晶粒度 ASTM	加工度%	
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Al	As	Cu	Nb+ Ta	V	O	Ti	9.3	18
0.043	0.65	1.64	0.010	0.005	13.70	17.5	2.27	0.04	0.0003	0.005	0.005	0.005	0.01	0.012	0.03	0.0017	0.012		

*ASTM Grain Size Number

表 2.2 供試料(2)の化学成分, 結晶粒度, 加工度

化 学 成 分 %																	結晶粒度 ASTM	加工度%	
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Al	As	Cu	Nb+ Ta	V	O	Ti	9.0	20
0.058	0.51	1.84	0.007	0.005	13.85	16.78	2.30	0.01	0.0004	0.0066	0.016	0.002	0.02	0.015	0.005	0.0009	0.03		

表 2.3 供試料(3)の化学成分, 結晶粒度, 加工度

化 学 成 分 %																	結晶粒度 ASTM	加工度%	
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Al	As	Cu	Nb+ Ta	V	O	Ti	7.5	18
0.041	0.52	1.52	0.019	0.008	13.1	17.5	2.52	0.03	0.0008	0.0046	0.006	0.002	0.09	0.002	0.001	0.001	0.002		

表 2.4 供試料(4)の化学成分, 結晶粒度, 加工度

化 学 成 分 %																	結晶粒度 ASTM	加工度%	
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Al	As	Cu	Nb+ Ta	V	O	Ti	7.5	20
0.046	0.50	1.52	0.019	0.007	13.15	17.45	2.50	0.01	0.0001	0.0058	0.012	0.002	0.03	0.002	0.002	0.0012	0.002		

放電加工により人工欠陥をつけた STB の化学成分, 結晶粒度, 加工度を表 2.5 に, 人工欠陥の位置および大きさを図 2.1, 表 2.6 に示す。

表 2.5 STB の化学成分, 結晶粒度, 加工度

化 学 成 分 %																	結晶粒度 ASTM	加工度%	
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Al	As	Cu	Nb+ Ta	V	O	Ti	8.0	20
0.050	0.51	1.84	0.022	0.008	12.80	16.75	2.52	0.01	0.0001	0.011	0.001	0.002	0.13	0.002	0.001	0.0046	0.002		

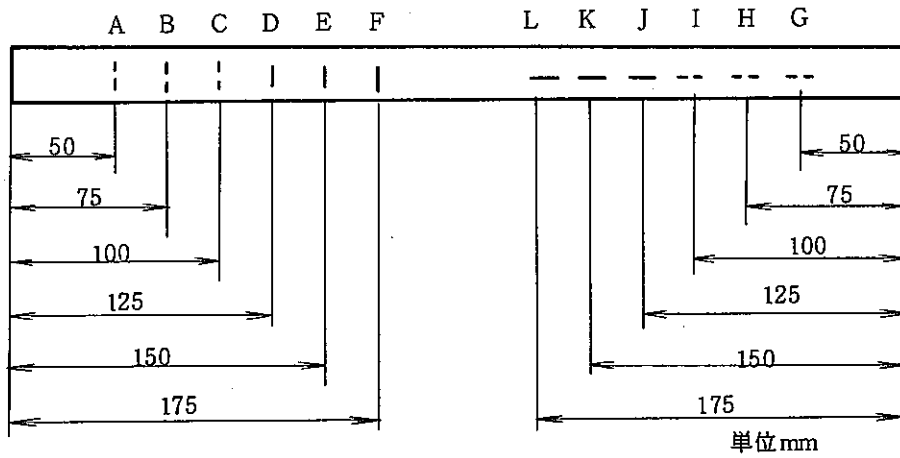


図 21 STB の欠陥加工位置

表 2.6 STB の人工欠陥寸法

周 方 向 欠 陥					軸 方 向 欠 陥				
欠陥No.	深さμ	幅μ	長さmm	備 考	欠陥No.	深さμ	幅μ	長さmm	備 考
A	20.5	30	0.76	内 面	G	20.5	31	0.76	内 面
B	31.5	31	0.76	"	H	33.5	31	0.76	"
C	41.5	33	0.76	"	I	41.5	34	0.77	"
D	22	30	0.77	外 面	J	21.5	30	0.77	外 面
E	32	30	0.77	"	K	30.5	30	0.77	"
F	42.5	30	0.77	"	L	42	30	0.77	"

3. 実験方法

実験は要因効果を定量的に分析し、シャワーエコー発生要因のうち要因の優劣をデータ量の獲得効率を高めることによってできるだけ正確に推定するという目的から、すべて $L_{16} (4 \times 2^{12})$ の直交表に基づく実験計画法によって行なった。

すなわち表 3.1 に示したような 5 因子についてその主効果と結晶粒度および探触子周波数、超音波ビーム径、探傷条件との各交互作用も調べられるように表 3.2 のわりつけ表に従って実験を進めた。

例えば表 3.2 における実験順序 No. 1 の試験では、試料被覆管については結晶粒度 7.5 [ASTM Grain Size Number 以下単に ASTM と記す] 冷間加工度 18 [%] のものを用い、探触子については探触子周波数 7 [MHz]、超音波ビーム径 0.3 [mm] のものを用いて、探傷条件は軸方向探傷の際は偏心量 1.2 [mm]、周方向探傷の際は入射角 22 [deg] で探傷を行なうことを示している。

また、試料被覆管の材質、径についてはすべて同一で探傷の際の探傷感度も同一とし欠陥検出ゲートの位置は従来の被覆管探傷における設定位置および水距離を一定とし、表面エコーからのゲート距離を一定とするゲート位置の二種類についてそれぞれ特性値を求めた。

以下に欠陥検出ゲートの位置を変えた際の具体的な実験方法を示す。

表 3.1 因子・水準の対応表

因子 わりつけ表の 対応番号	A	B	C	D	E 探傷条件	
	結晶粒度 ASTM	探触子周波数 MHz	冷間加工度 %	超音波ビーム径 mm	軸方向mm	周方向deg
1	7.5	7	18	0.3	1.2	22
2	9.0	10	20	0.5	1.3	24
3					1.1	20
4					1.0	26

表 3.2 L₁₆ によるわりつけ表 (*は各因子間の交互作用を示す)

因 子	A	B	C	D	E	A*B	A*D	A*E	e (誤差要因)
列番号 実験順序No	4	8	7	15	1,2,3	12	11	6	5,9,10,13,14
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	2	1	2	1	2	2	1	
3	2	1	2	2	1	2	1	2	
4	2	2	2	1	1	1	2	2	
5	1	1	2	2	2	1	2	2	
6	1	2	2	1	2	2	1	2	
7	2	1	1	1	2	2	2	1	
8	2	2	1	2	2	1	1	1	
9	1	1	2	2	3	1	2	1	
10	1	2	2	1	3	2	1	1	
11	2	1	1	1	3	2	2	2	
12	2	2	1	2	3	1	1	2	
13	1	1	1	1	4	1	1	2	
14	1	2	1	2	4	2	2	2	
15	2	1	2	2	4	2	1	1	
16	2	2	2	1	4	1	2	1	

3.1 従来の探傷条件設定でのゲート位置による試験

従来の探傷条件設定，すなわち軸方向欠陥探傷試験においては探触子ビームが STB 被覆管の軸方向に垂直に当たるように上下方向の位置設定をした後入射する縦波の表面反射エコーが CRT 上で最大となるように探触子の前後方向の位置調節を行ない，その点から探触子を上下方向に偏心させ，各偏心量において STB の内外面中欠陥エコーの第 2 波が最大となり，大中小の欠陥反射エコーがほぼ比例の大小関係を示すように欠陥検出ゲート位置の設定および探触子の前後移動調節を行ない，表 3.2 の直交表に従って 2.1(5)の探触子 4 個および 2.2 の試料被覆管 4 本により順次，探傷条件を変えて探傷試験を行なった。

また，周方向欠陥探傷試験においては探触子ビームの表面エコーが CRT 上で最大となるように探触子の前後，上下方向の位置調節を行なった後，探触子の首振りを行ない，各入射角において STB の内外面中欠陥反射エコーの第 2 波が最大となり，大中小の欠陥エコーがほぼ比例の大小関係を示すように欠陥検出ゲート位置の設定および探触子の前後移動調節を行ない，表 3.2 の直交表に従って探傷試験を行なった。

なお，軸，周方向欠陥探傷とも同一探傷器感度で行ない，軸方向欠陥探傷では探傷器感度 1.5 (リジェクション 2.0)，周方向欠陥探傷では探傷器感度 2.0 (リジェクション 2.0) とした。

3.2 焦点距離を一定とし表面反射エコーからのゲート距離を一定とするゲート位置による試験（探傷感度一定）

3.1の従来法によるゲート位置設定ではゲート位置が可変で、ビーム焦点位置も可変のため特性値に誤差要因が大きく入り込むことが考えられたので焦点距離を各探触子ごとに一定とし、表面反射エコーからゲートまでの距離も一定として試験を行なった。

すなわち、3.1と同様にして探触子ビームの表面反射エコーがCRT上で最大となるように探触子の前後・上下方向の位置調節を行なった後、周、軸方向欠陥探傷とも、各偏心量、入射角での各探触子の焦点距離、ゲート距離がオシロスコープにより読みとった条件、表3.3のように一定となるよう探触子の偏心、首振りを行ない、表3.2のわりつけ表に従って探傷試験を行なった。

なお、軸方向、周方向欠陥探傷とも探傷感度 1.5×1 （リジェクション2.0）の同一条件で行なった。

表 3.3 焦点距離・ゲート距離条件

探触子周波数・ビーム径	焦点距離 μsec	ゲート距離 μsec
B 2 D 2 10MHz 0.5mm ϕ	20.8	3.2
B 2 D 1 10MHz 0.3mm ϕ	19.2	3.2
B 1 D 2 7MHz 0.5mm ϕ	18.8	3.2
B 1 D 1 7MHz 0.3mm ϕ	15.2	3.2

3.3 焦点距離を一定とし表面反射エコーからのゲート距離を一定とするゲート位置による試験（探傷感度変化）

3.2の焦点距離、ゲート距離を一定とし探傷感度を一定とする探傷試験では各探触子の表面反射エコーの音圧エネルギーに差が見られ、これを減衰器により測定したところ表3.4に示すような値が得られた。

なお、この表における値は表面反射エコー高さがCRT上で探傷感度 1.5×1 （リジェクション2.0）から、100%飽和点に減衰するまでのdB差で示した。

表 3.4 各探触子における表面反射エコーの音圧エネルギーの差

探触子周波数・ビーム径	減衰 dB差	dB
B 2 D 2 10MHz 0.5mm ϕ	29.5	
B 2 D 1 10MHz 0.3mm ϕ	28.5	
B 1 D 2 7MHz 0.5mm ϕ	21.0	
B 1 D 1 7MHz 0.3mm ϕ	25.5	

このため、10MHz・0.5mm ϕ の探触子での探傷器感度 1.5×1 （軸，周方向欠陥探傷とも）における表面反射エコー高さ感度を基準として、他の3個の探触子感度をそれぞれ10MHz・0.3mm ϕ については1[dB] 7MHz・0.5mm ϕ については8.5[dB]、7MHz・0.3mm ϕ については4[dB]感度を上げて探傷試験を行なった。

探傷試験方法は3.2と同様で軸，周方向欠陥探傷とも焦点距離，ゲート距離は表3.3のように設定し，実験順序はすべて表3.2のわりつけ表に従い，3.1，3.2のゲート位置設定の違いによる試験の比較を行なった。

4. 実験結果

3.1～3.3の実験方法に従い、得られた軸、周方向欠陥探傷試験データはすべて、それぞれのゲート位置設定試験について、以下に示す分散分析によって要因効果を定量的に解析した。

なお、ここで求めた特性値データは、まずチャート上でのシャワーエコーの面積を金属組織定量解析装置によって求め、これをチャート長さで割った平均シャワーエコー高さで示した。

分散分析法による具体的な解析式を以下に示す。

軸方向欠陥探傷試験 特性値データ $X_1 \sim X_{16}$

周方向欠陥探傷試験 特性値データ $Y_1 \sim Y_{16}$

とすると、

$$\text{修正項 } CF = (X_1 + \dots + X_{16})^2 / 16, (Y_1 + \dots + Y_{16})^2 / 16$$

であり、表 3.1 の因子・水準の対応表および表 3.2 のわりつけ表に対応して、各因子変動値は

$$S_A (\text{結晶粒度}) = \{ (A1 \text{ の合計値})^2 + (A2 \text{ の合計値})^2 \} / 8 - CF$$

$$S_B (\text{探触子周波数}) = \{ (B1 \text{ の合計値})^2 + (B2 \text{ の合計値})^2 \} / 8 - CF$$

$$S_C (\text{冷間加工度}) = \{ (C1 \text{ の合計値})^2 + (C2 \text{ の合計値})^2 \} / 8 - CF$$

$$S_D (\text{超音波ビーム径}) = \{ (D1 \text{ の合計値})^2 + (D2 \text{ の合計値})^2 \} / 8 - CF$$

$$S_E (\text{探傷条件}) = \{ (E1 \text{ の合計値})^2 + (E2 \text{ の合計値})^2 + (E3 \text{ の合計値})^2 + (E4 \text{ の合計値})^2 \} / 4 - CF$$

$$S_{A*B} (\text{結晶粒度と探触子周波数の交互作用}) = \{ (A1B1 \text{ の合計値})^2 + (A2B2 \text{ の合計値})^2 + (A1B2 \text{ の合計値})^2 + (A2B1 \text{ の合計値})^2 \} / 4 - CF - S_A - S_B$$

$$S_{A*D} (\text{結晶粒度と超音波ビーム径の交互作用}) = \{ (A1D1 \text{ の合計値})^2 + (A2D2 \text{ の合計値})^2 + (A1D2 \text{ の合計値})^2 + (A2D1 \text{ の合計値})^2 \} / 4 - CF - S_A - S_D$$

$$S_{A*E} (\text{結晶粒度と探傷条件の交互作用}) = \{ (A1E1 \text{ の合計値})^2 + (A2E1 \text{ の合計値})^2 + (A1E2 \text{ の合計値})^2 + (A2E2 \text{ の合計値})^2 + (A1E3 \text{ の合計値})^2 + (A2E3 \text{ の合計値})^2 + (A1E4 \text{ の合計値})^2 + (A2E4 \text{ の合計値})^2 \} / 2 - CF - S_A - S_E$$

$$\text{全変動 } S_T = (X_1^2 + \dots + X_{16}^2) - CF, (Y_1^2 + \dots + Y_{16}^2) - CF$$

誤差 2 乗和 S_e は誤差自由度の調整から

3.1 の試験方法による

$$\text{軸方向欠陥探傷試験 } S_e = S_B + S_C + S_{A*B} + S_{A*D}$$

周方向欠陥探傷試験 $S_e = S_C + S_D + S_{A*D} + S_{A*E}$

3.2 の試験方法による

軸方向欠陥探傷試験 $S_e = S_C + S_D + S_{A*D} + S_{A*E}$

周方向欠陥探傷試験 $S_e = S_C + S_D + S_{A*D} + S_{A*E}$

3.3 の試験方法による

軸方向欠陥探傷試験 $S_e = S_C + S_D + S_E + S_{A*D}$

周方向欠陥探傷試験 $S_e = S_C + S_D + S_E + S_{A*D}$

F検定 (5%有意さの判定)

$F_A = 6 \cdot S_A / S_e$

$F_B = 6 \cdot S_B / S_e$

$F_C = 6 \cdot S_C / S_e$

$F_D = 6 \cdot S_D / S_e$

$F_E = 2 \cdot S_E / S_e$

$F_{A*B} = 6 \cdot S_{A*B} / S_e$

$F_{A*D} = 6 \cdot S_{A*D} / S_e$

$F_{A*E} = 2 \cdot S_{A*E} / S_e$

信頼限界 (95%信頼度)

$$\pm \sqrt{\frac{F_6^t(0.05) \times V_e}{n_e}}$$

ここに $V_e = S_e / 6$, $n_e = 16 / 12$

寄与率の計算

$\rho_A = 100 \cdot (S_A - S_e) / S_T$ [%]

$\rho_B = 100 \cdot (S_B - S_e) / S_T$ [%]

$\rho_C = 100 \cdot (S_C - S_e) / S_T$ [%]

$\rho_D = 100 \cdot (S_D - S_e) / S_T$ [%]

$\rho_E = 100 \cdot (S_E - 3 S_e) / S_T$ [%]

$\rho_{A*B} = 100 \cdot (S_{A*B} - S_e) / S_T$ [%]

$\rho_{A*D} = 100 \cdot (S_{A*D} - S_e) / S_T$ [%]

$\rho_{A*E} = 100 \cdot (S_{A*E} - 3 S_e) / S_T$ [%]

4.1 従来の探傷条件設定でのゲート位置による試験結果

3.1の実験方法に基づきシャワーエコーを記録した軸方向欠陥探傷記録を図4.1に、周方向欠陥探傷記録を図4.2に示す。

また、このチャートから金属組織定量解析装置(画像解析装置)により求めたシャワーエコーの平均高さを表4.1に示しその平均高さを特性値として上述の計算式より算出した分散分析表を表4.2、表4.3に示す。

さらに、この表から各要因についての特性値に対する関係を信頼限界95%幅を伴う図4.3～図4.18に示す。

表 4.1 シャワーエコーの平均高さ測定結果

軸方向欠陥探傷結果		周方向欠陥探傷結果	
実験順序No	平均高さmm	実験順序No	平均高さmm
1	13.633	1	5.606
2	10.952	2	11.511
3	0.689	3	0.599
4	0.804	4	2.069
5	0.642	5	0.770
6	15.165	6	10.494
7	0.313	7	0.468
8	0.337	8	0.290
9	0.829	9	0.587
10	9.267	10	14.821
11	0.297	11	0.459
12	0.256	12	0.441
13	12.325	13	3.746
14	10.194	14	13.181
15	0.577	15	0.615
16	1.137	16	5.751

表 4.2 軸方向欠陥探傷結果の分散分析表

要因	自由度 df	変動 SS	ms (ss/df)	F検定	寄与率 ρ(%)
A	1	294.087	294.087	**	55.0
B	1	22.103	22.103	-	1.3
C	1	23.034	23.034	-	1.5
D	1	53.637	53.637	-	6.9
E	3	38.300	12.767	-	1.5
A*B	1	19.117	19.117	-	0.8
A*D	1	45.832	45.832	-	6.0
A*E	3	27.629	9.209	-	2.4
(e)	(6)	(91.884)	(15.314)		(24.6)
T	12	507.095			

(**は1%で有意, *は5%で有意であることを示す)

表 4.3 周方向欠陥探傷結果の分散分析表

要因	自由度 df	変動 SS	ms (ss/df)	F検定	寄与率 ρ(%)
A	1	156.402	156.402	**	38.1
B	1	130.566	130.566	**	31.7
C	1	1.834×10^{-4}	1.834×10^{-4}	-	0.8
D	1	14.858	14.858	-	2.9
E	3	17.425	5.808	-	2.0
A*B	1	67.612	67.612	**	16.0
A*D	1	0.211	0.211	-	0.7
A*E	3	3.894	1.298	-	1.4
(e)	(6)	(18.963)	(3.161)		(6.4)
T	12	402.525			

表 4.2 の分散分析結果から軸方向探傷においては結晶粒度，超音波ビーム径，冷間加工度，探傷条件，探触子周波数の順に要因効果が認められ，特に結晶粒度の要因効果が大きいことがわかる。また他の要因効果も含めた誤差要因の寄与率が周方向探傷試験に比べて高くなっている。

図 4.3 ～図 4.10 の各要因とシャワーエコー平均高さの特性値との関係のグラフからシャワーエコーを最小に抑える各要因の条件は結晶粒度 9.0 [ASTM]，探触子周波数 7 [MHz]，冷間加工度 20 [%]，超音波ビーム径 0.5 [mmφ]，軸方向探傷条件偏心量 1.1 [mm] であることが推定される。

また，表 4.3 の分散分析結果から周方向探傷においては結晶粒度，探触子周波数，超音波ビーム径，探傷条件，冷間加工度の順に要因効果が認められ，特に結晶粒度と探触子周波数の要因効果が大きくなっており，図 4.11 ～図 4.18 の各要因の特性値に対する関係を表わしたグラフからシャワーエコーの最適抑止条件は結晶粒度 9.0 [ASTM]，探触子周波数 7 [MHz]，冷間加工度 20 [%]，超音波ビーム径 0.5 [mmφ]，探傷条件入射角 24 [deg] であることが推定される。

4.2 焦点距離を一定とし表面反射エコーからのゲート距離を一定とするゲート位置による試験結果（探傷感度一定）

3.2 の実験方法に基づき，シャワーエコーを記録した軸方向欠陥探傷記録結果を図 4.19 に，周方向欠陥探傷記録結果を図 4.20 に示す。

また，このチャートから金属組織定量解析装置（画像解析装置）により求めたシャワーエコーの平均高さを表 4.4 に示し，この平均高さを特性値として上述の計算式より算出した分散分析表を表 4.5，表 4.6 に示す。

さらに，この表から各要因についての特性値に対する関係を信頼限界 95%幅を伴う図 4.21 ～図 4.36 に示す。

表 4.4 シャワーエコーの平均高さ測定結果

軸方向欠陥探傷結果		周方向欠陥探傷結果	
実験順序No	平均高さmm	実験順序No	平均高さmm
1	0.649	1	0.460
2	8.073	2	2.998
3	0.679	3	0.514
4	0.844	4	0.615
5	0.636	5	0.497
6	5.402	6	4.341
7	0.694	7	0.502
8	0.664	8	0.517
9	0.588	9	0.485
10	5.704	10	0.629
11	0.559	11	0.481
12	0.538	12	0.614
13	0.519	13	0.413
14	5.256	14	5.495
15	0.638	15	0.543
16	0.868	16	0.798

表 4.5 軸方向欠陥探傷結果の分散分析表

要因	自由度 df	変動 SS	ms (ss/df)	F検定	寄与率 ρ (%)
A	1	28.483	28.483	**	29.8
B	1	31.231	31.231	**	32.7
C	1	0.154	0.154	—	0.2
D	1	0.205	0.205	—	0.2
E	3	1.576	0.525	—	0.6
A*B	1	29.442	29.442	**	30.8
A*D	1	0.469	0.469	—	0.1
A*E	3	1.260	0.420	—	0.2
(e)	(6)	(2.088)	(0.348)		(5.4)
T	12	94.057			

表 4.6 周方向欠陥探傷結果の分散分析表

要因	自由度 df	変動 SS	ms (ss/df)	F検定	寄与率 ρ (%)
A	1	7.181	7.181	*	17.0
B	1	9.149	9.149	*	22.3
C	1	0.581	0.581	—	0.8
D	1	0.728	0.728	—	0.4
E	3	3.432	1.144	—	2.2
A*B	1	7.688	7.688	*	18.3
A*D	1	0.917	0.917	—	0.1
A*E	3	3.015	1.005	—	1.1
(e)	(6)	(5.241)	(0.873)		(37.8)
T	12	37.163			

表 4.5 の分散分析結果から軸方向探傷においては探触子周波数，結晶粒度，探傷条件，超音波ビーム径，冷間加工度の順に要因効果が認められ，特に結晶粒度と探触子周波数の要因効果が大きくなっていることがわかる。また，誤差要因の寄与率が従来の探傷法によるゲート位置での試験結果より小さくなっている。

図 4.21 ~ 図 4.28 の各要因とシャワーエコー平均高さの特性値との関係を示したグラフからシャワーエコーを最小にする条件は結晶粒度 9.0 [ASTM]，探触子周波数 7 [MHz]，冷間加工度 20 [%]，超音波ビーム径 0.3 [mmφ]，探傷条件偏心量 1.1 [mm] であることが推定され，従来法によるゲート位置での試験結果と比較してわずかに超音波ビーム径が小さい方が抑止条件として適しているという逆の結果が得られた。

表 4.6 の分散分析結果から，周方向探傷においては探触子周波数，結晶粒度，探傷条件，超音波ビーム径，冷間加工度の順に要因効果が認められ，特に結晶粒度と探触子周波数の要因効果が大きくなっている。

また，誤差要因の寄与率は従来法のゲート位置による試験結果に比べてかなり高くなっている。

図 4.29 ~ 図 4.36 の各要因と特性値との関係のグラフからシャワーエコーを最小にする各要因の条件は結晶粒度 9.0 [ASTM]，探触子周波数 7 [MHz]，冷間加工度 20 [%]，超音波ビーム径

0.5 [mm ϕ], 探傷条件入射角 24 [deg] となることが推定される。

また, 以上から, 軸, 周方向探傷試験の分散分析結果と各要因の特性値に対する要因効果は従来法のゲート位置による試験結果と誤差要因の寄与率に多少の違いが見られるが似たような傾向を示していることがわかる。

4.3 焦点距離を一定とし表面反射エコーからのゲート距離を一定とするゲート位置による試験結果(探傷感度変化)

3.3 の実験方法に基づき, シャワーエコーを記録した軸方向欠陥探傷記録を図 4.37 に, 周方向欠陥探傷記録を図 4.38 に示す。

また, このチャートから金属組織定量解析装置(画像解析装置)により求めたシャワーエコーの平均高さを表 4.7 に示し, この平均高さを特性値として上述の計算式より算出した分散分析表を表 4.8, 表 4.9 に示す。

さらに, この表から各要因についての特性値に対する関係を信頼限界95%幅を伴う図 4.39 ~ 図 4.54 に示す。

表 4.7 シャワーエコー平均高さ測定結果

軸方向欠陥探傷結果		周方向欠陥探傷結果	
実験順序No	平均高さ mm	実験順序No	平均高さ mm
1	0.655	1	0.678
2	7.368	2	1.383
3	0.656	3	0.710
4	0.775	4	0.893
5	0.672	5	0.599
6	5.282	6	3.212
7	0.524	7	0.678
8	0.894	8	0.812
9	0.652	9	0.683
10	4.810	10	3.316
11	0.628	11	0.501
12	0.848	12	0.655
13	0.710	13	0.572
14	5.742	14	4.972
15	0.640	15	0.659
16	0.913	16	0.731

表 4.8 軸方向欠陥探傷結果の分散分析表

要因	自由度 df	変動 SS	ms (ss/df)	F検定	寄与率 ρ (%)
A	1	25.030	25.030	**	30.2
B	1	28.880	28.880	**	34.9
C	1	0.552	0.552	—	0.2
D	1	0.631	0.631	—	0.2
E	3	0.906	0.302	—	0.5
A*B	1	23.838	23.838	**	28.7
A*D	1	0.483	0.483	—	0.1
A*E	3	0.946	0.315	—	0.4
(e)	(6)	(2.572)	(0.429)		(4.8)
T	12	81.485			

表 4.9 周方向欠陥探傷結果の分散分析表

要因	自由度 df	変動 SS	ms (ss/df)	F検定	寄与率 ρ (%)
A	1	5.973	5.973	**	22.2
B	1	7.415	7.415	**	27.7
C	1	1.898×10^{-2}	1.898×10^{-2}	—	0.8
D	1	7.668×10^{-4}	7.668×10^{-4}	—	1.1
E	3	1.341	0.447	—	2.5
A*B	1	6.015	6.015	**	22.3
A*D	1	1.804×10^{-3}	1.804×10^{-3}	—	0.9
A*E	3	1.761	0.587	—	4.2
(e)	(6)	(1.363)	(0.227)		(15.3)
T	12	25.927			

表 4.8 の分散分析結果から軸方向探傷においては、探触子周波数、結晶粒度、探傷条件、超音波ビーム径、冷間加工度の順に要因効果が認められ、特に結晶粒度と探触子周波数は大きな要因効果を占めている。

また、誤差要因の寄与率は 4.2 の軸方向探傷分散分析における結果と同じように小さくなっており、図 4.39～図 4.46 の各要因と特性値との関係を示すグラフからシャワーエコーを最小にする各要因の条件は、結晶粒度 9.0 [ASTM]、探触子周波数 7 [MHz]、冷間加工度 20 [%]、超音波ビーム径 0.3 [mmφ]、探傷条件偏心量 1.1 [mm] となることが推定される。

表 4.9 の分散分析結果から、周方向探傷においては、探触子周波数、結晶粒度、探傷条件、超音波ビーム径、冷間加工度の順に要因効果が認められ、軸方向探傷と同様に、特に結晶粒度と探触子周波数に大きな要因効果が認められる。

誤差要因の寄与率は 4.2 の周方向探傷分散分析における結果と同じように大きくなっており、図 4.47～図 4.54 の各要因と特性値との関係のグラフからシャワーエコーを最小にする各要因の条件は、結晶粒度 9.0 [ASTM]、探触子周波数 7 [MHz]、冷間加工度 20 [%]、超音波ビーム径

0.5 [mm ϕ], 探傷条件入射角 22 [deg] となることが推定される。

また、以上から軸、周方向探傷試験の分散分析結果と各要因の特性値に対する要因効果は従来法のゲート位置による試験結果と似たような傾向を示していることがわかる。

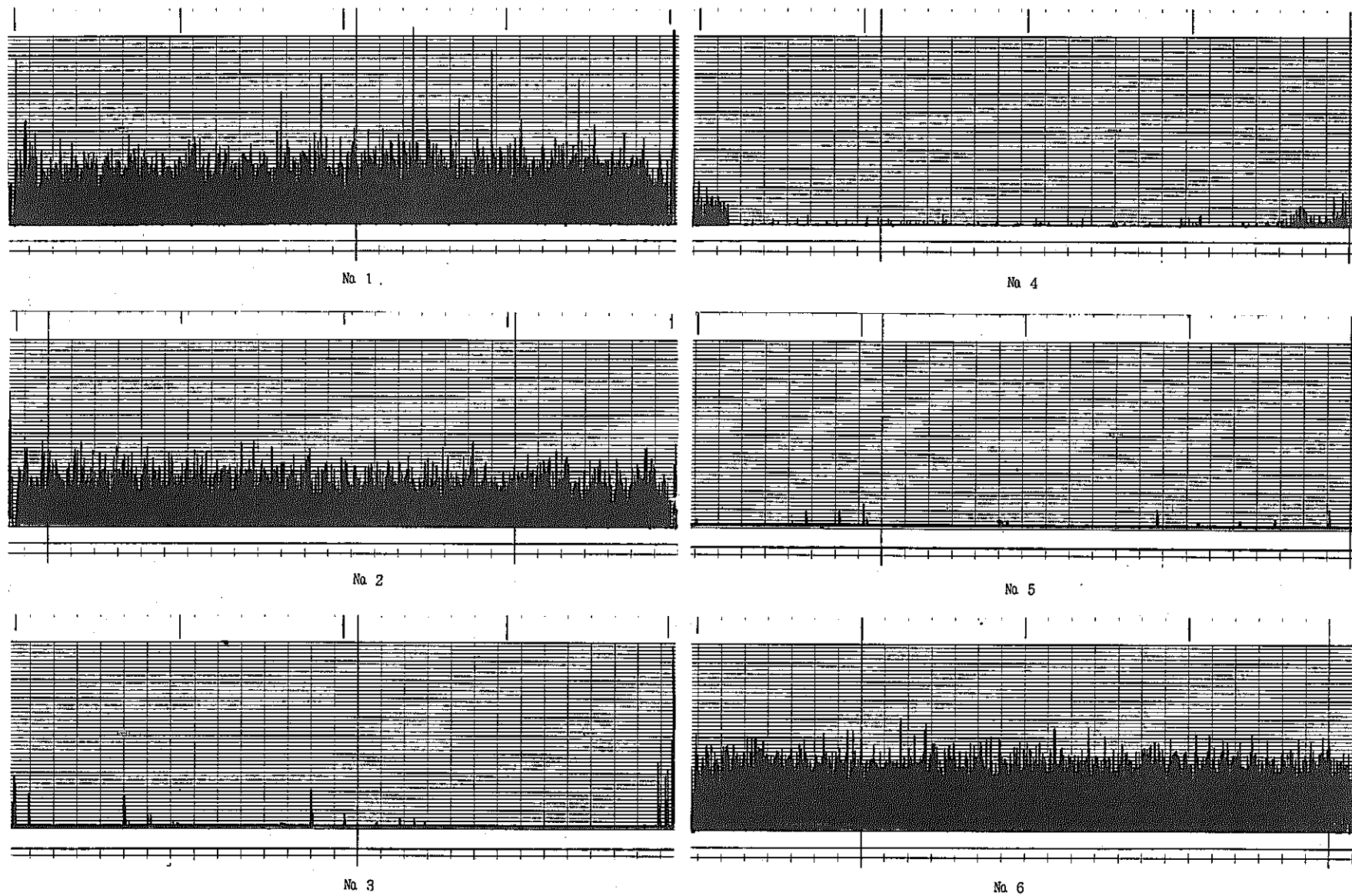
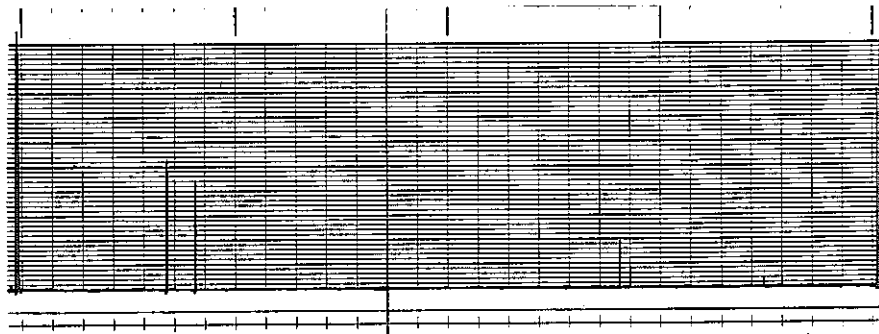
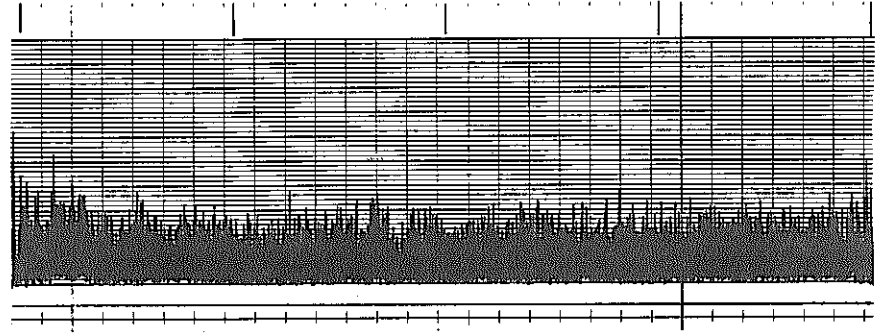


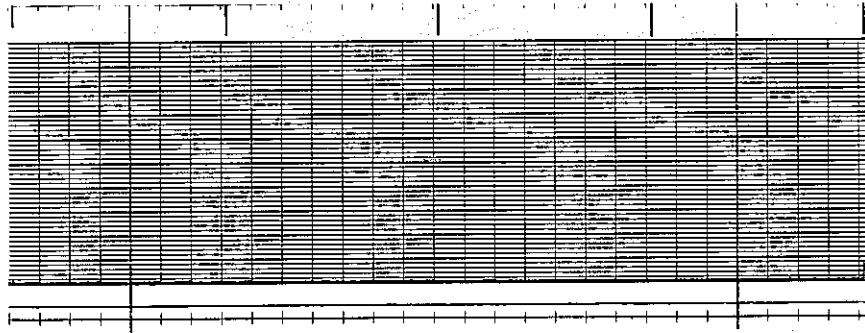
図 4.1 軸方向探傷記録 (その1)



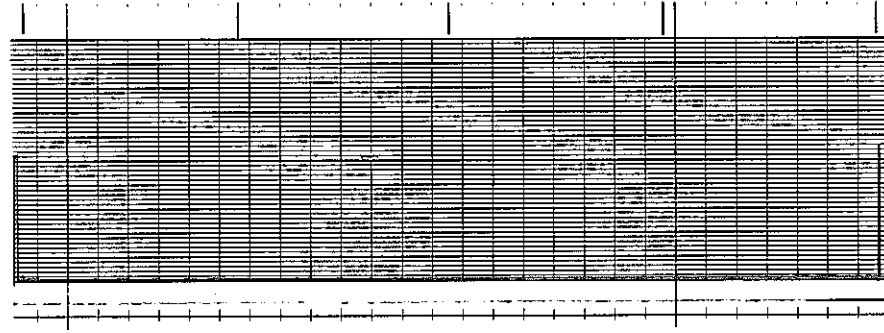
No 7



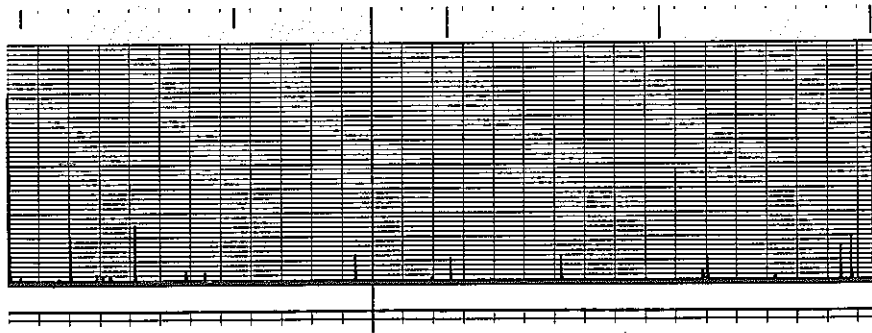
No 10



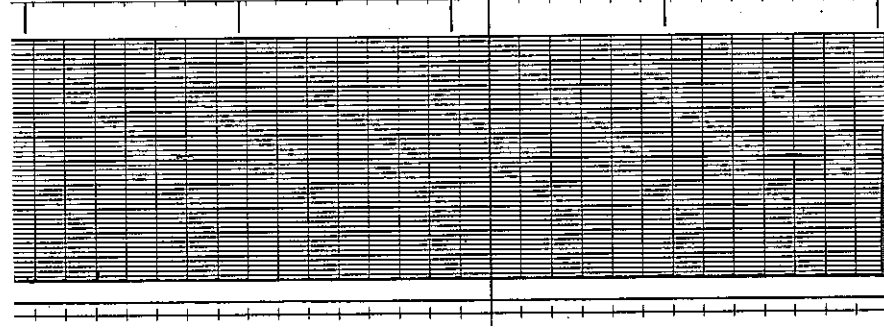
No 8



No 11

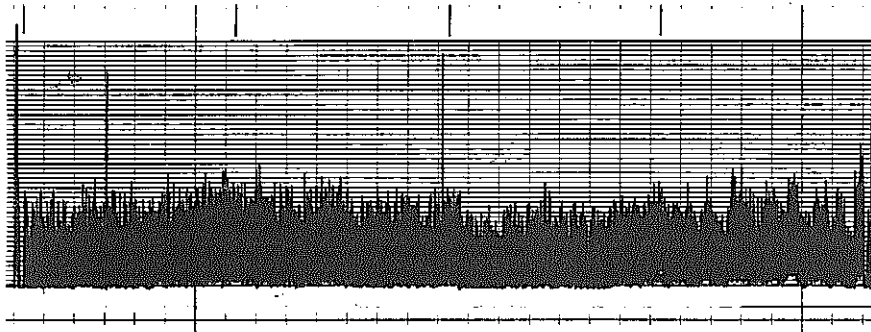


No 9

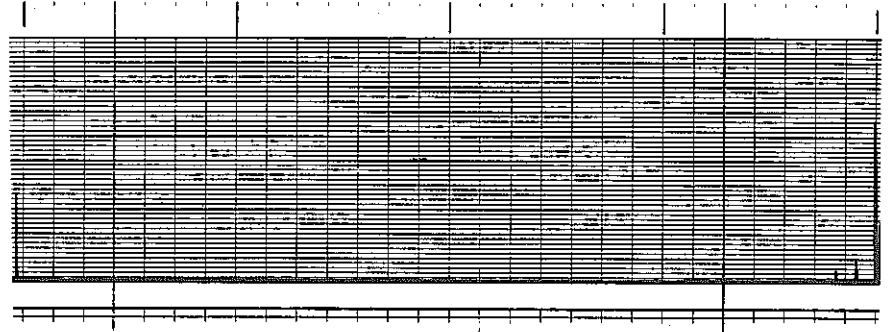


No 12

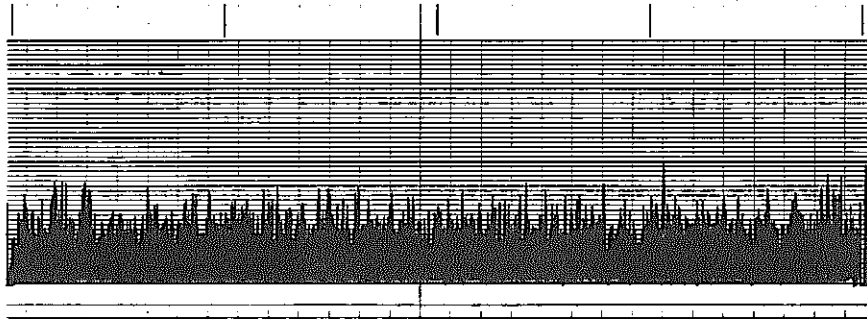
図 4.1 軸方向探傷記録 (その2)



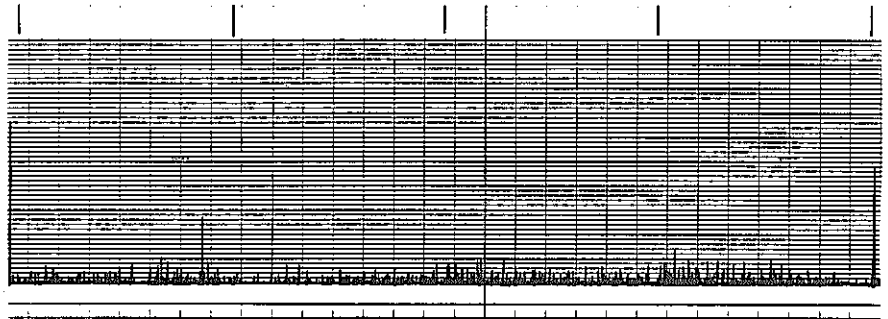
No. 13



No. 15



No. 14



No. 16

図 4.1 軸方向探傷記録 (その3)

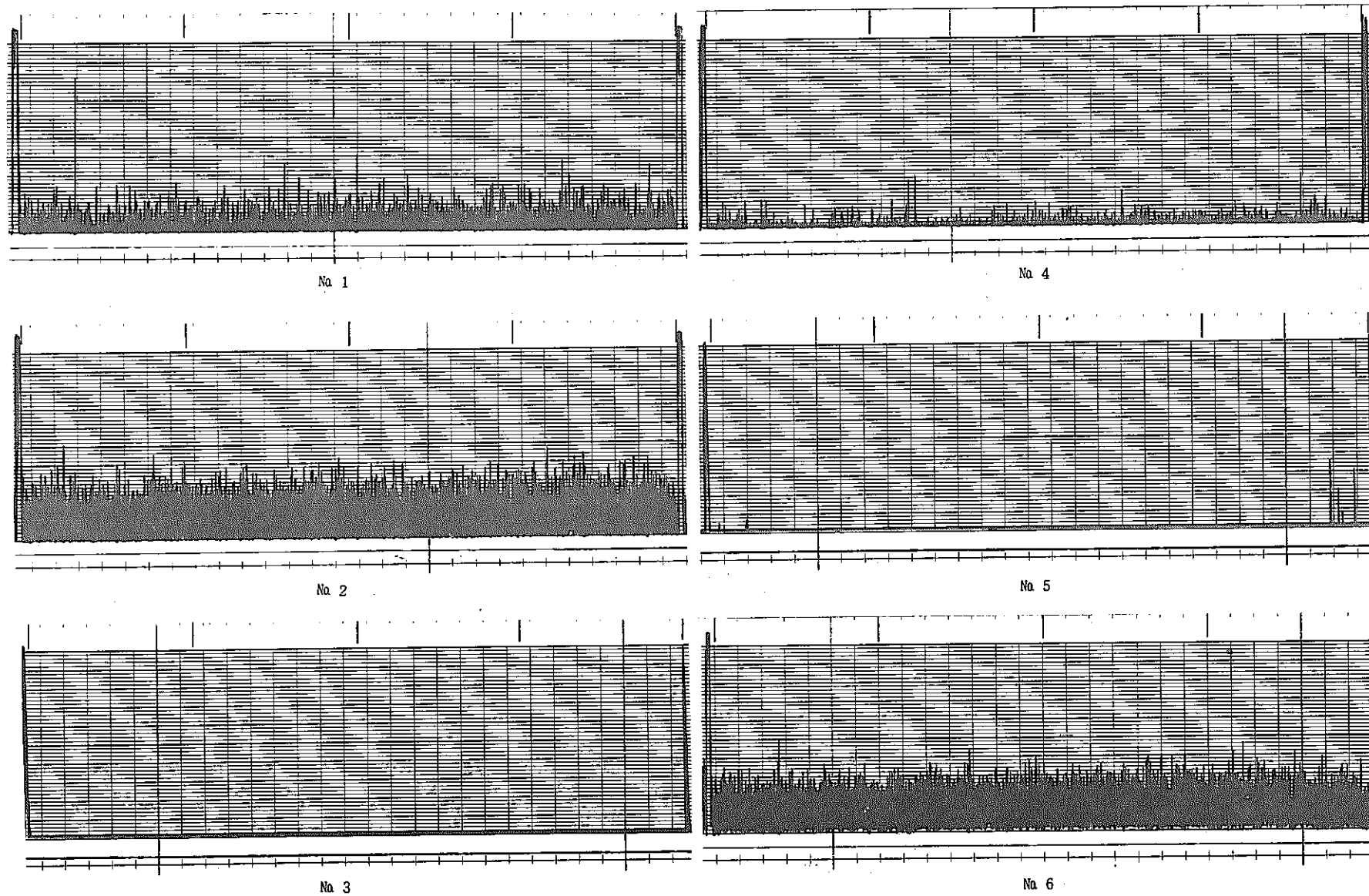


図 4.2 周方向探傷記録 (その1)

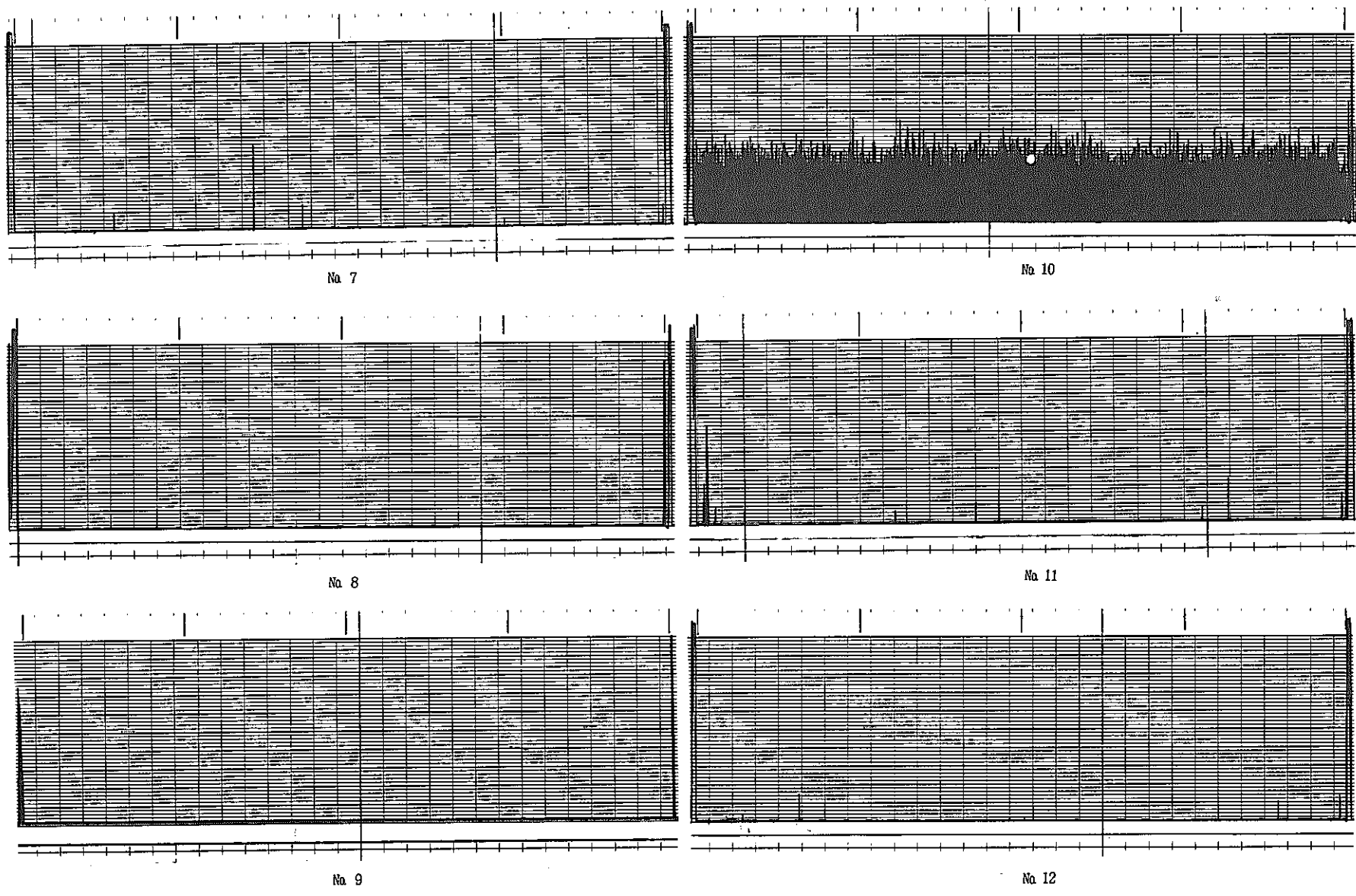


図 4.2 周方向探傷記録 (その2)

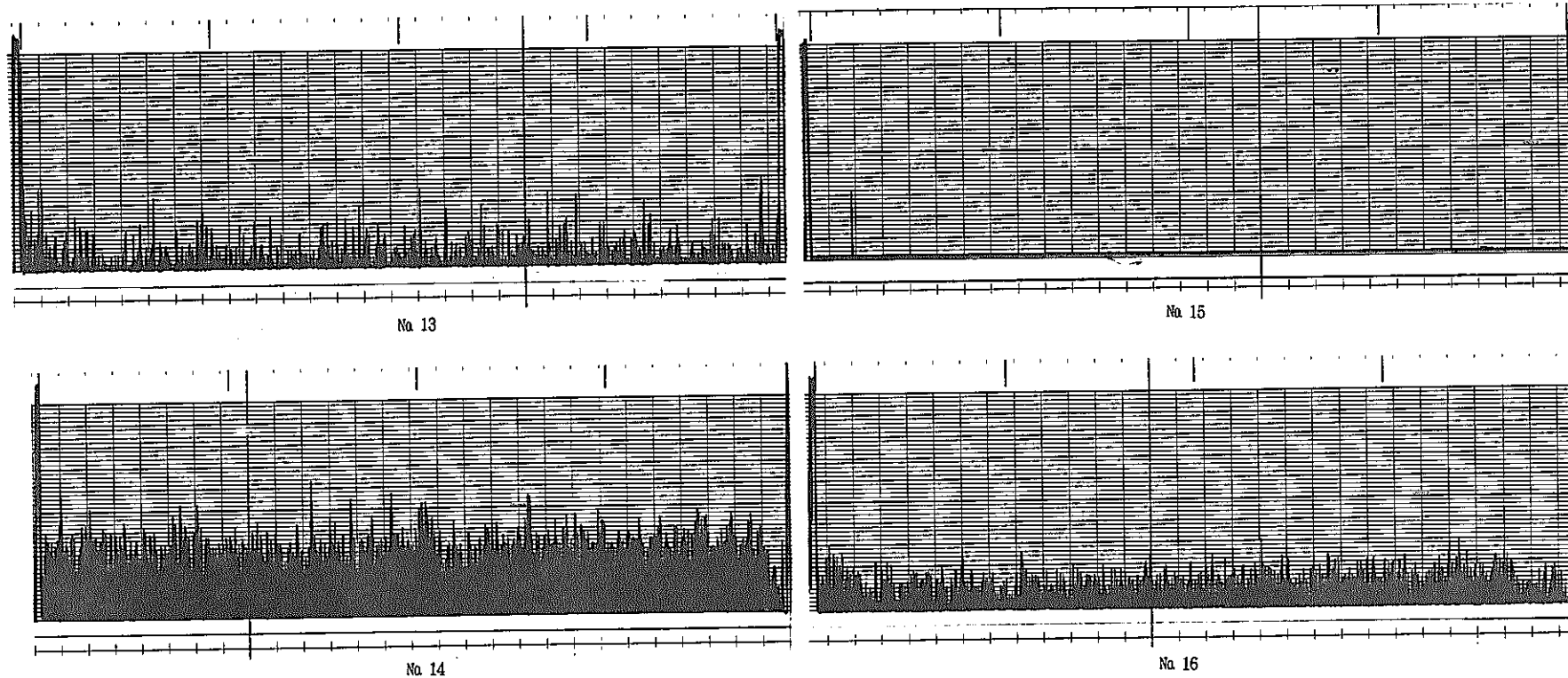


図 4.2 周方向探傷記録 (その3)

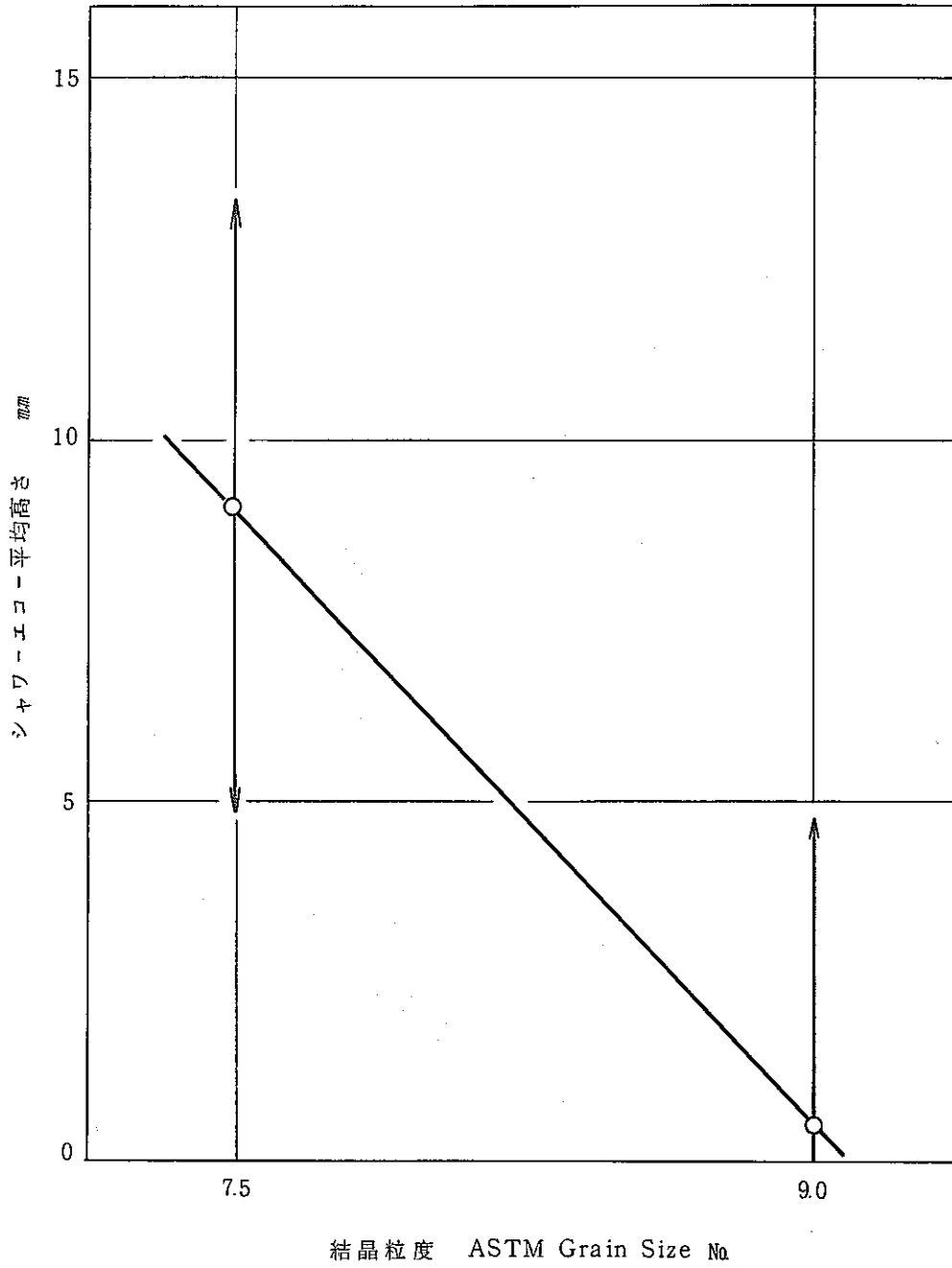


図 4.3 結晶粒度とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

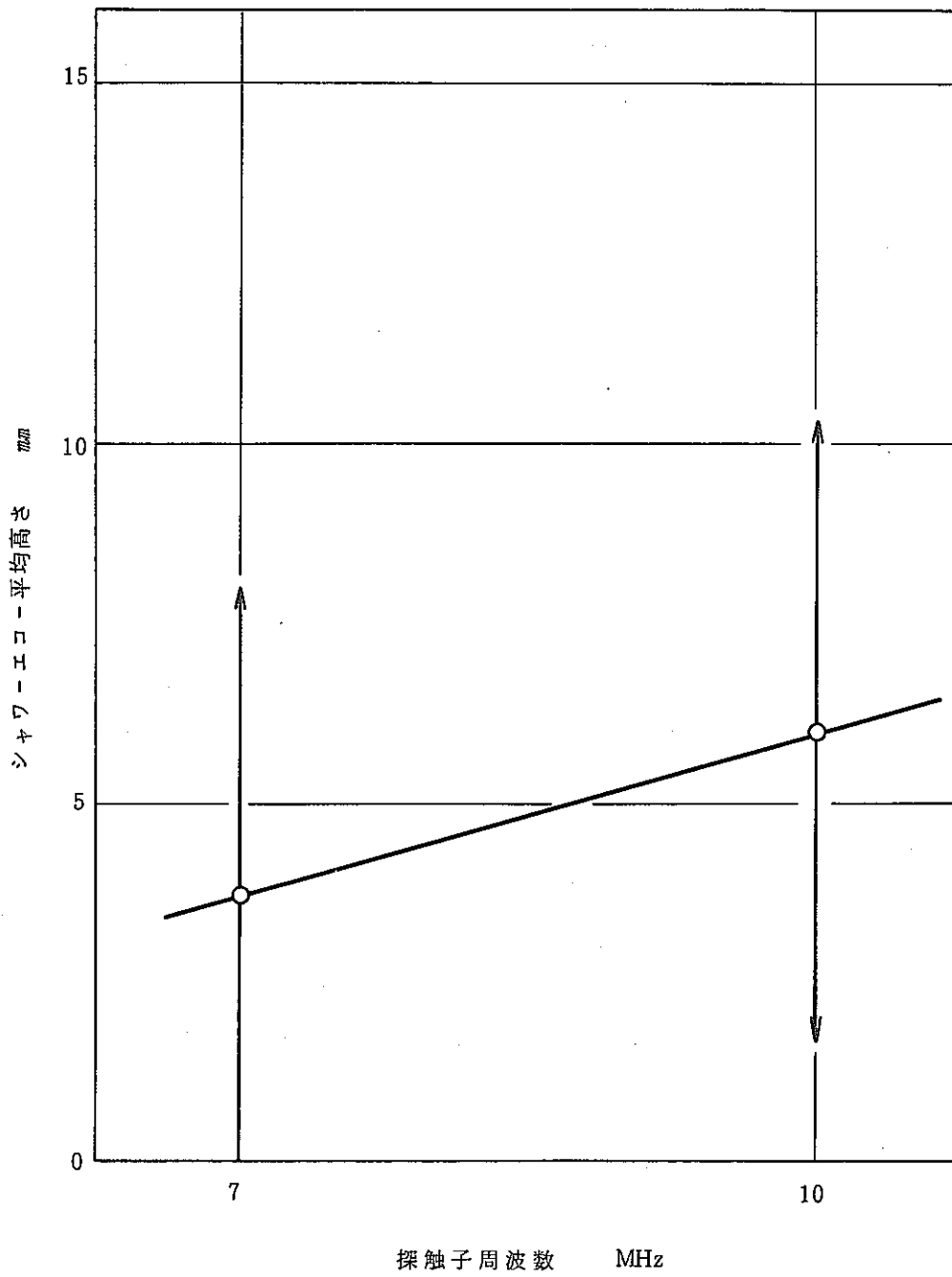


図 4.4 探触子周波数とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

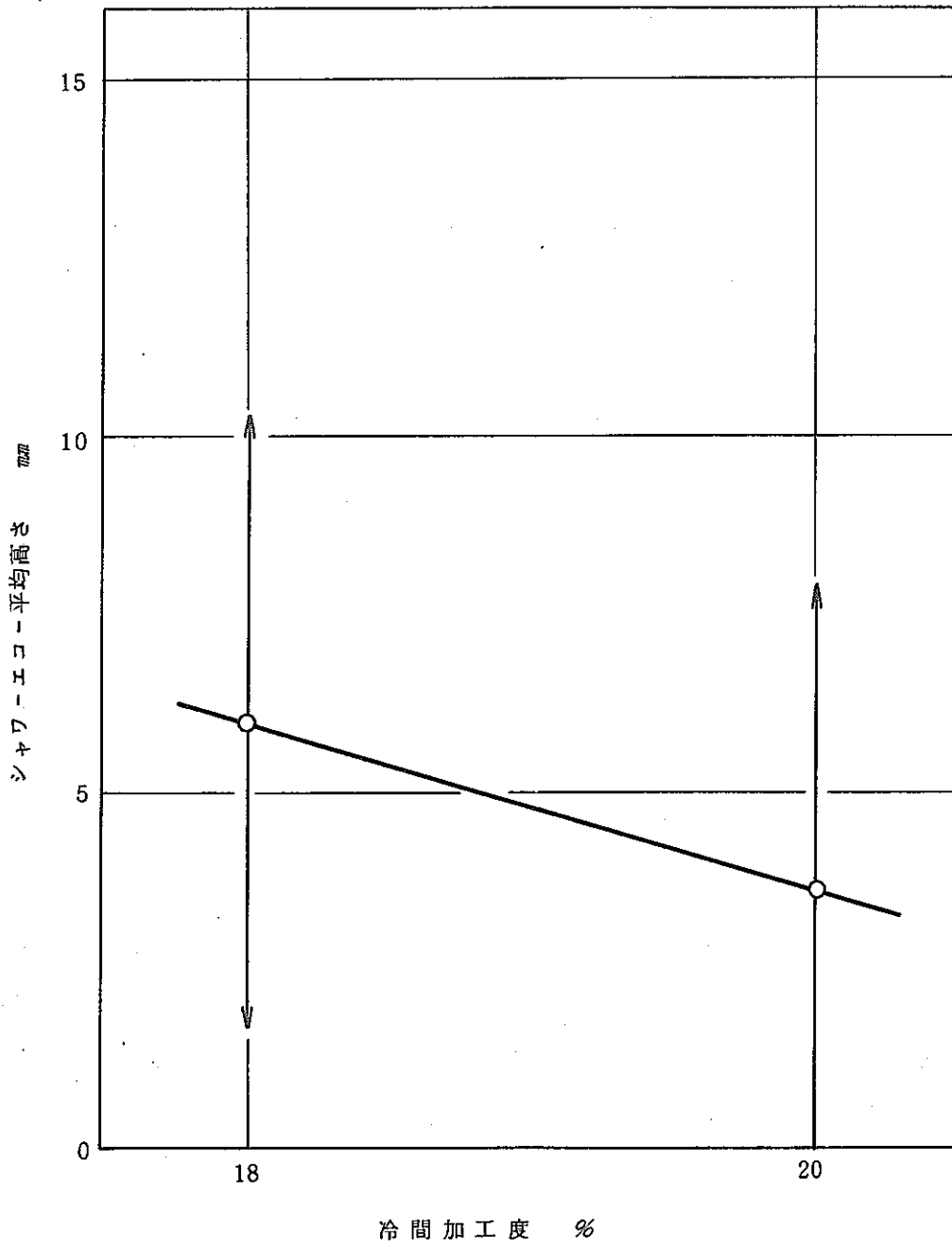


図 4.5 冷間加工度とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

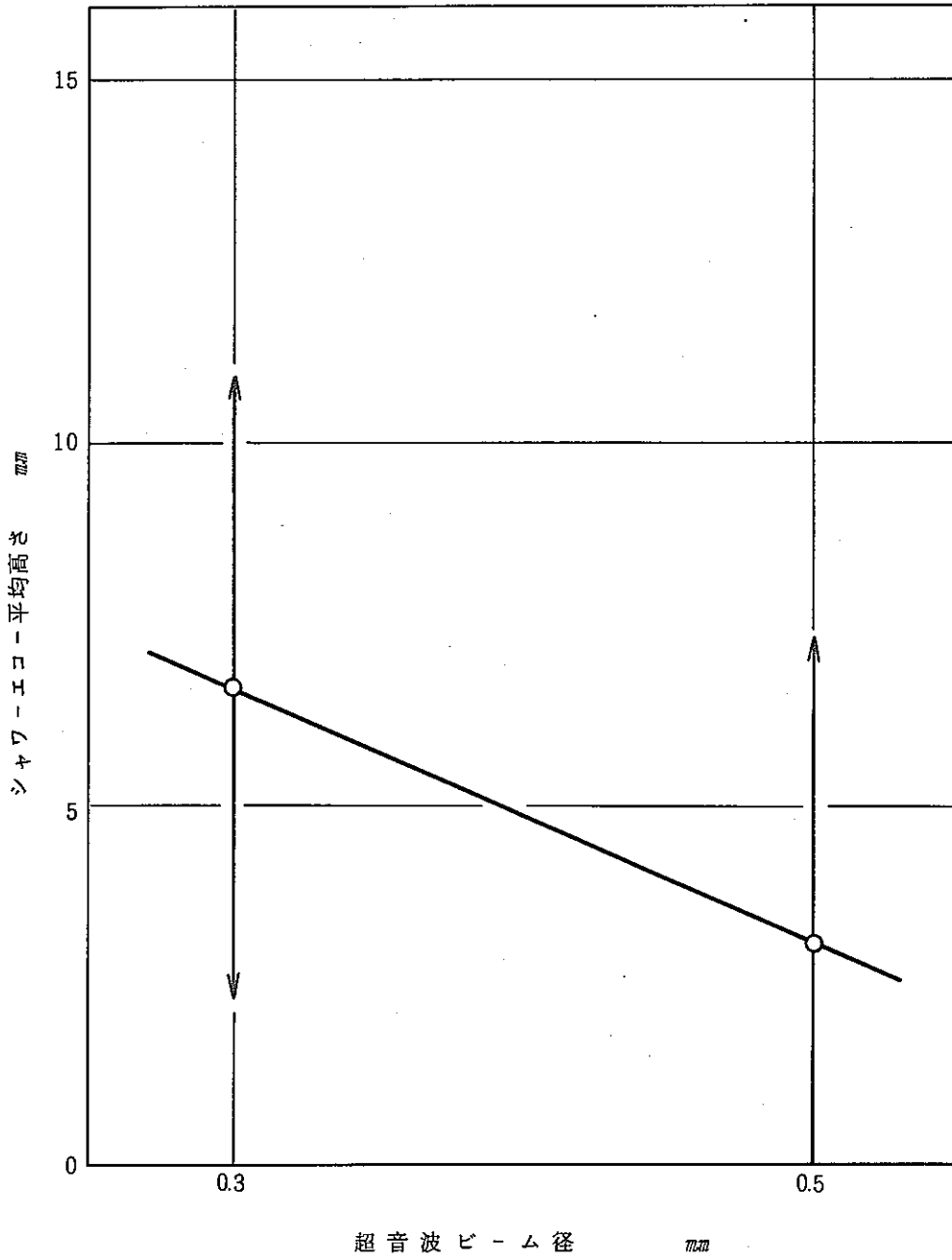


図 4.6 超音波ビーム径とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

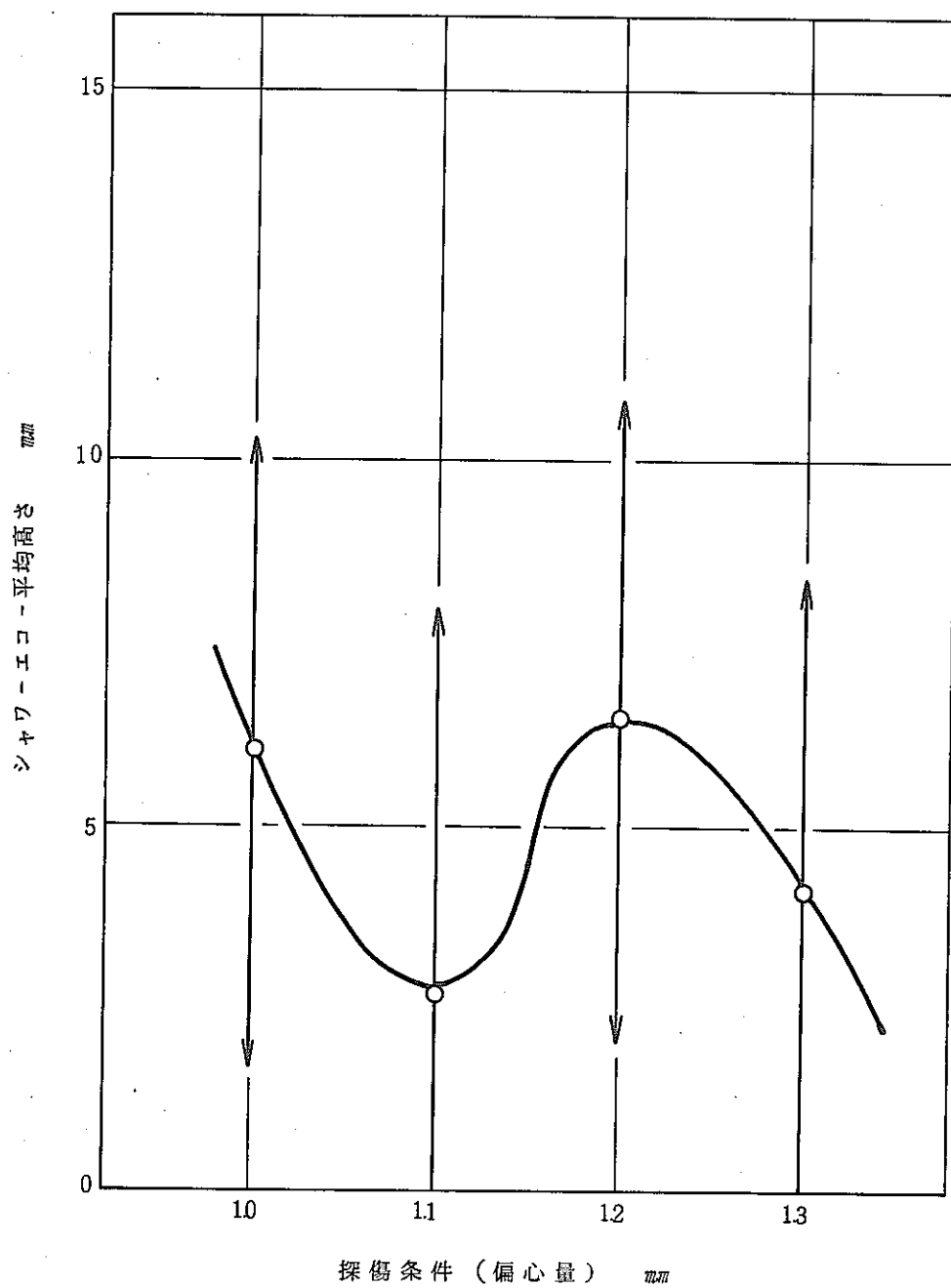


図 4.7 探傷条件とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

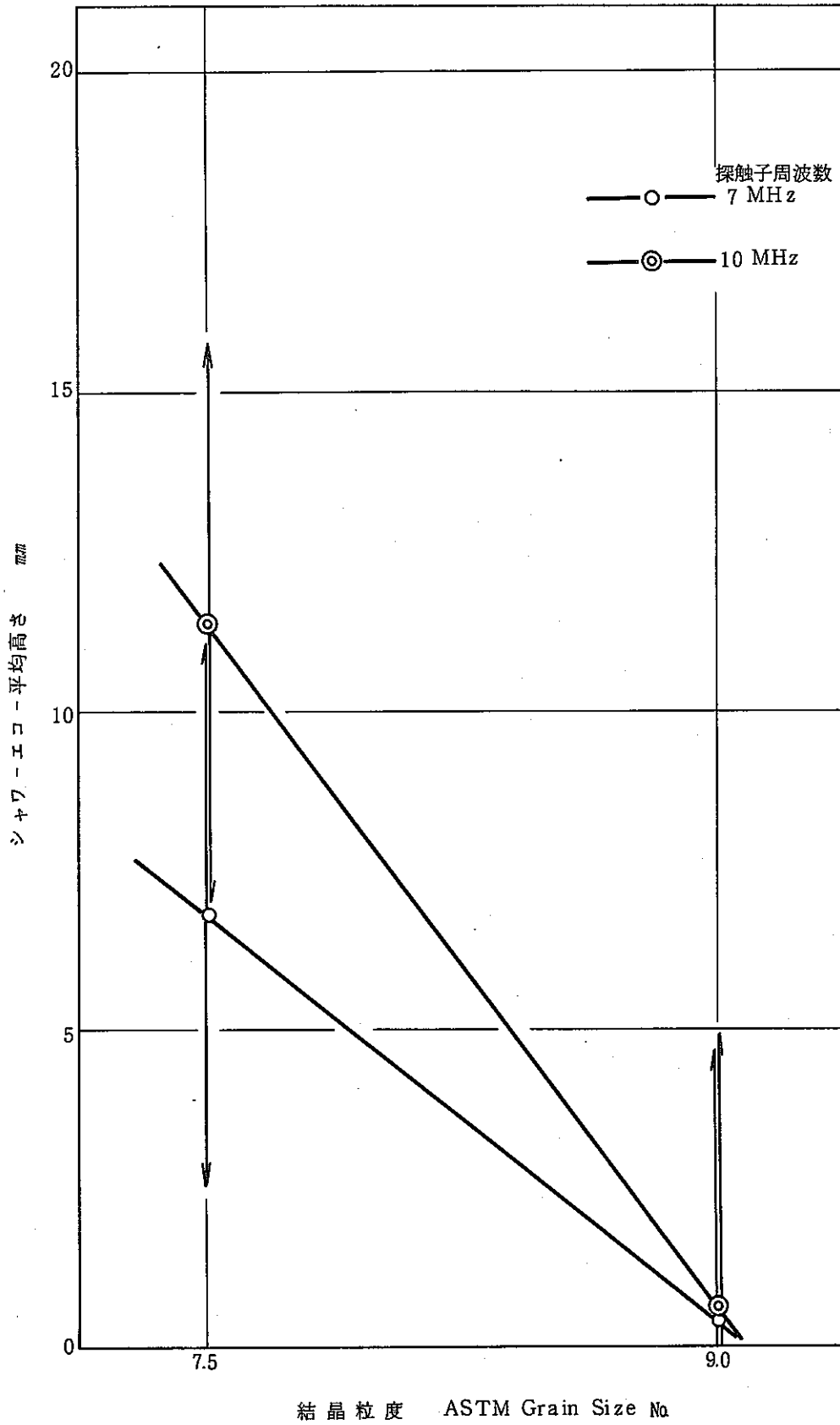


図 4.8 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と探触子周波数の関係 (軸方向欠陥探傷法)

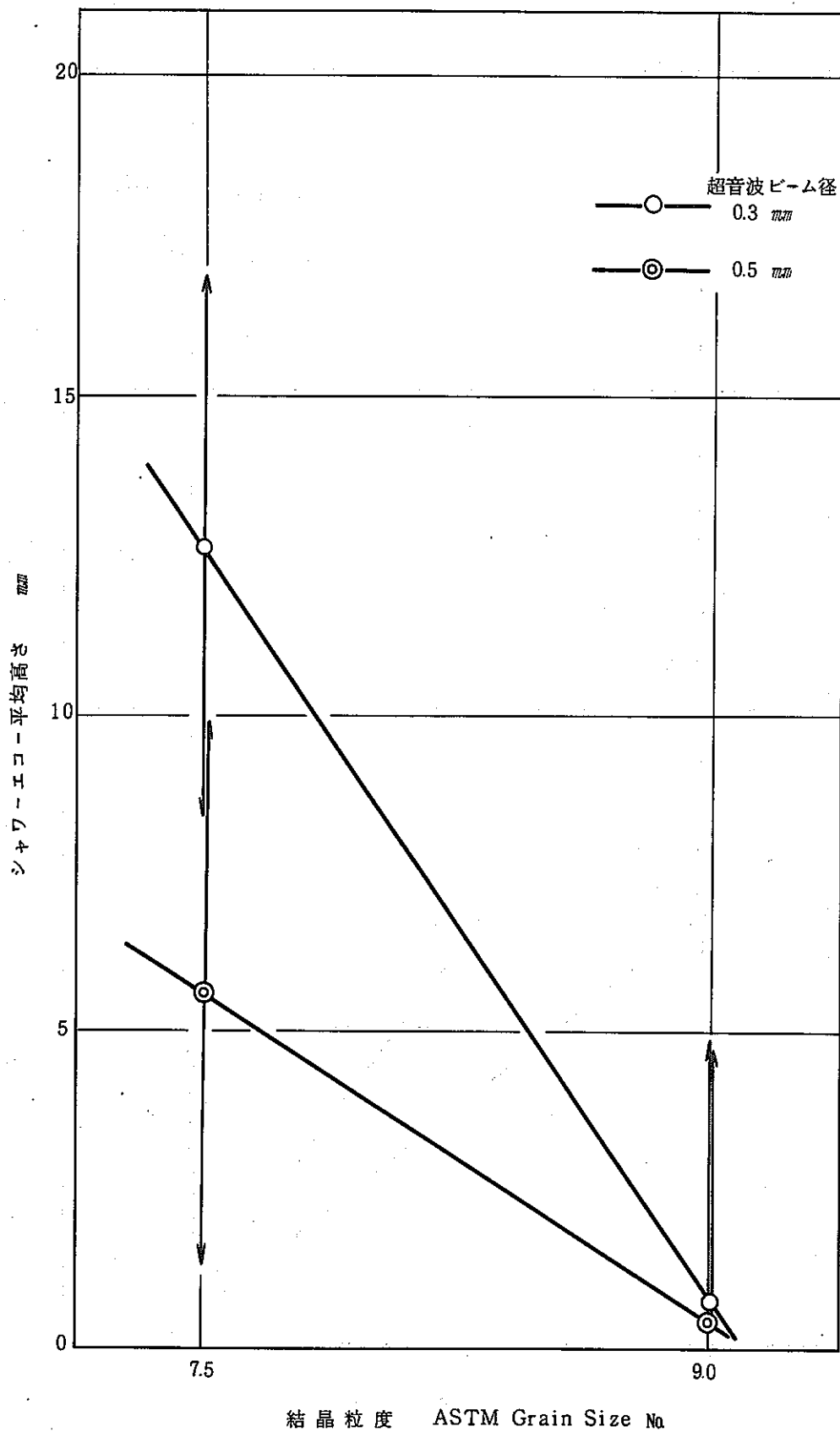


図 4.9 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と超音波ビーム径の関係 (軸方向欠陥探傷法)

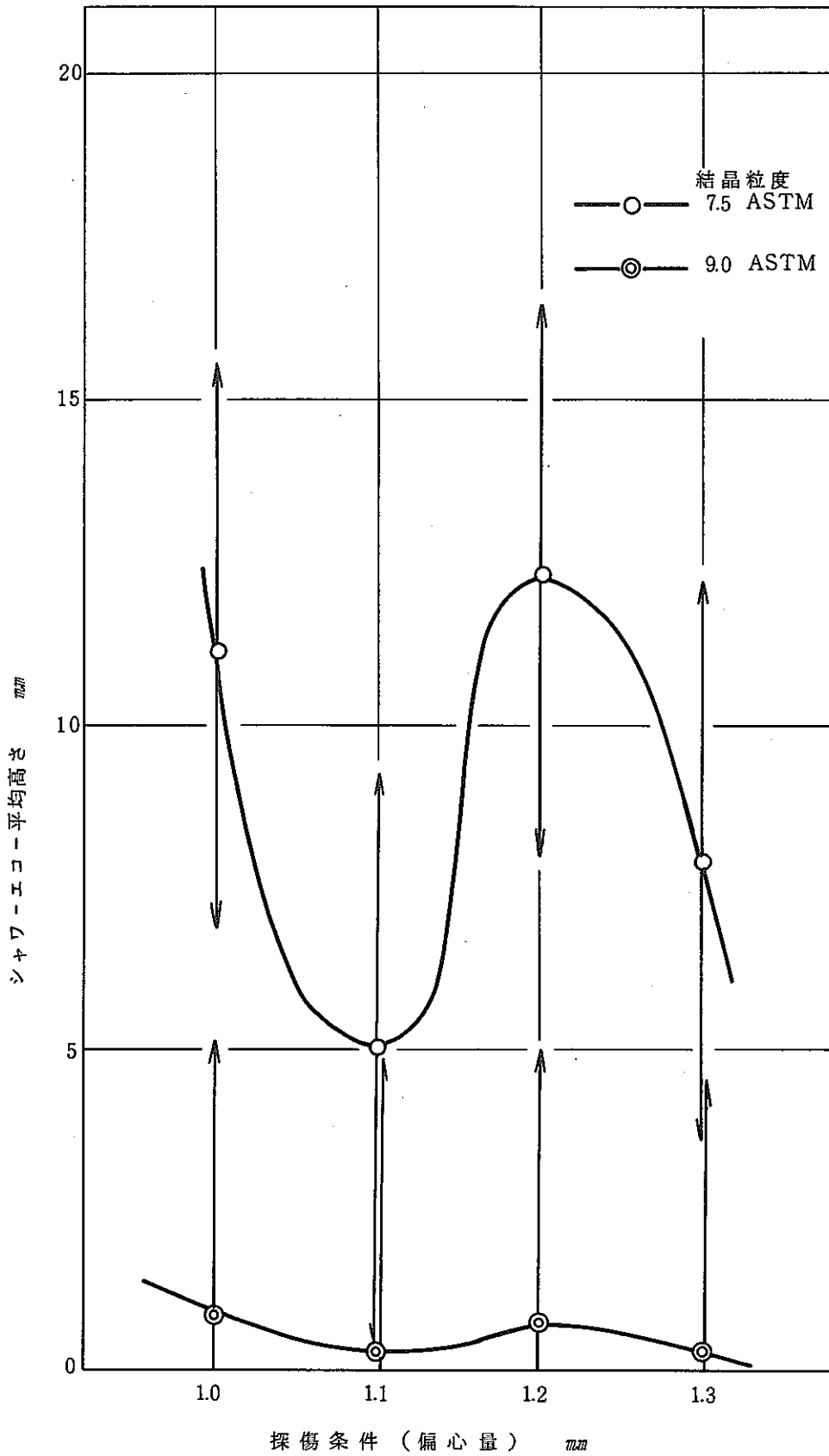


図 4.10 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と探傷条件の関係 (軸方向欠陥探傷法)

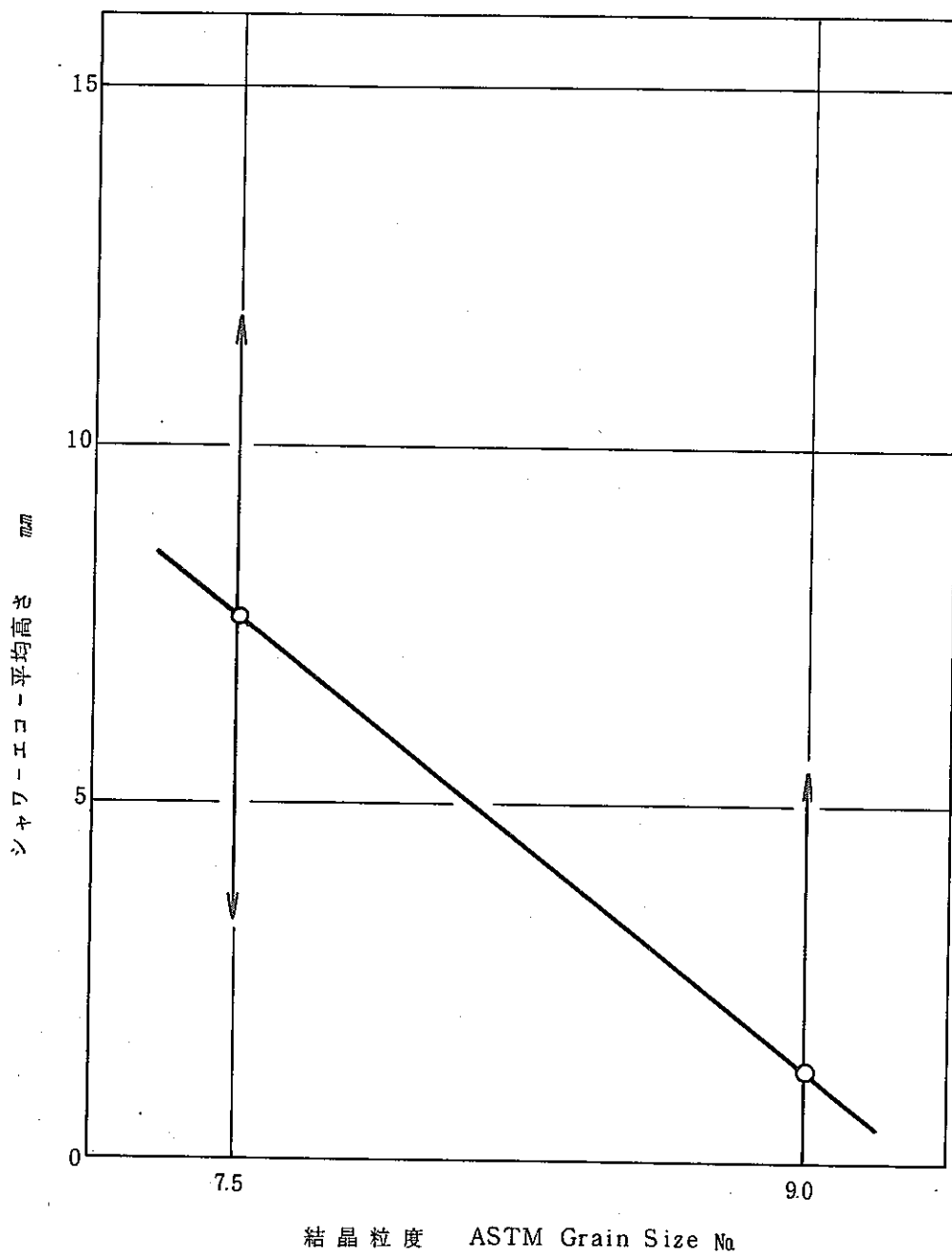


図 4.1.1 結晶粒度とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

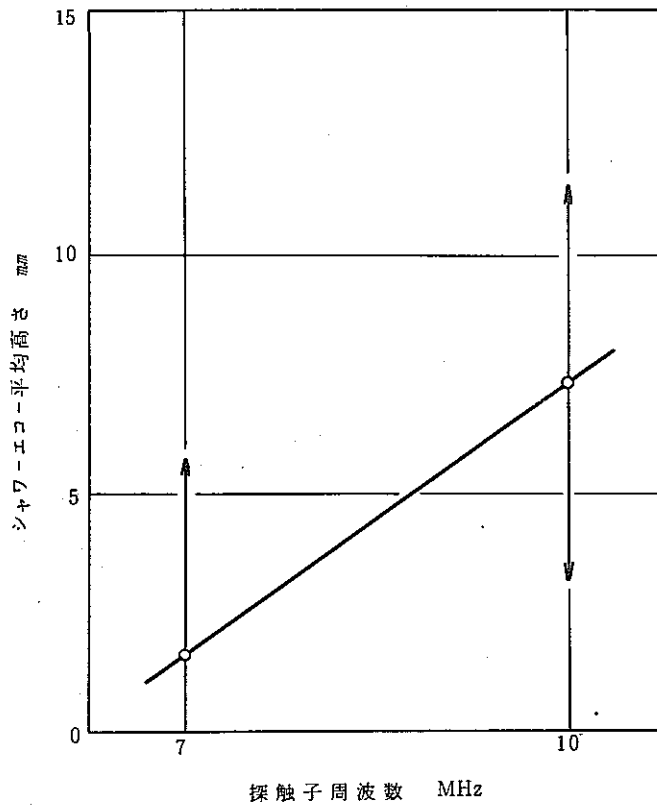


図 4.12 探触子周波数とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

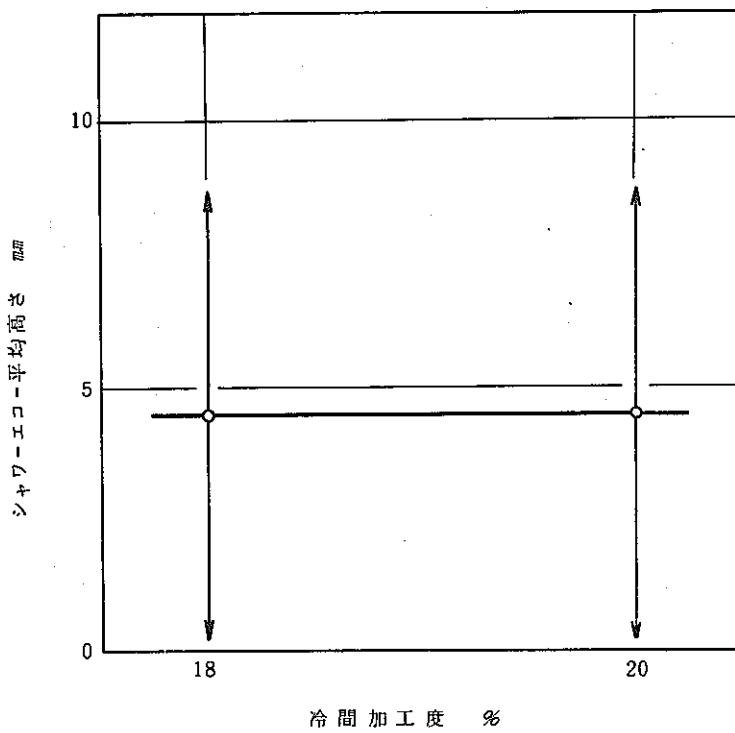


図 4.13 冷間加工度とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

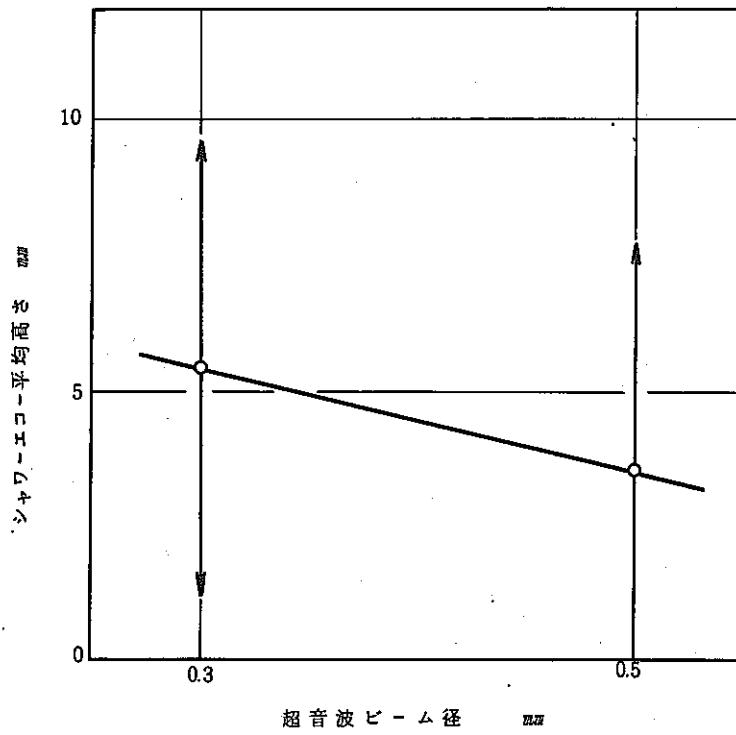


図 4.14 超音波ビーム径とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

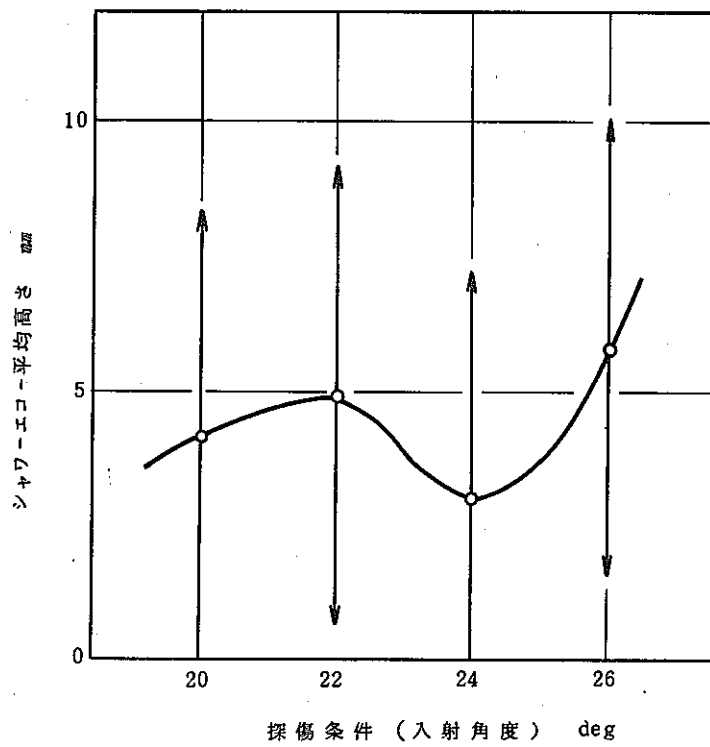


図 4.15 探傷条件とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

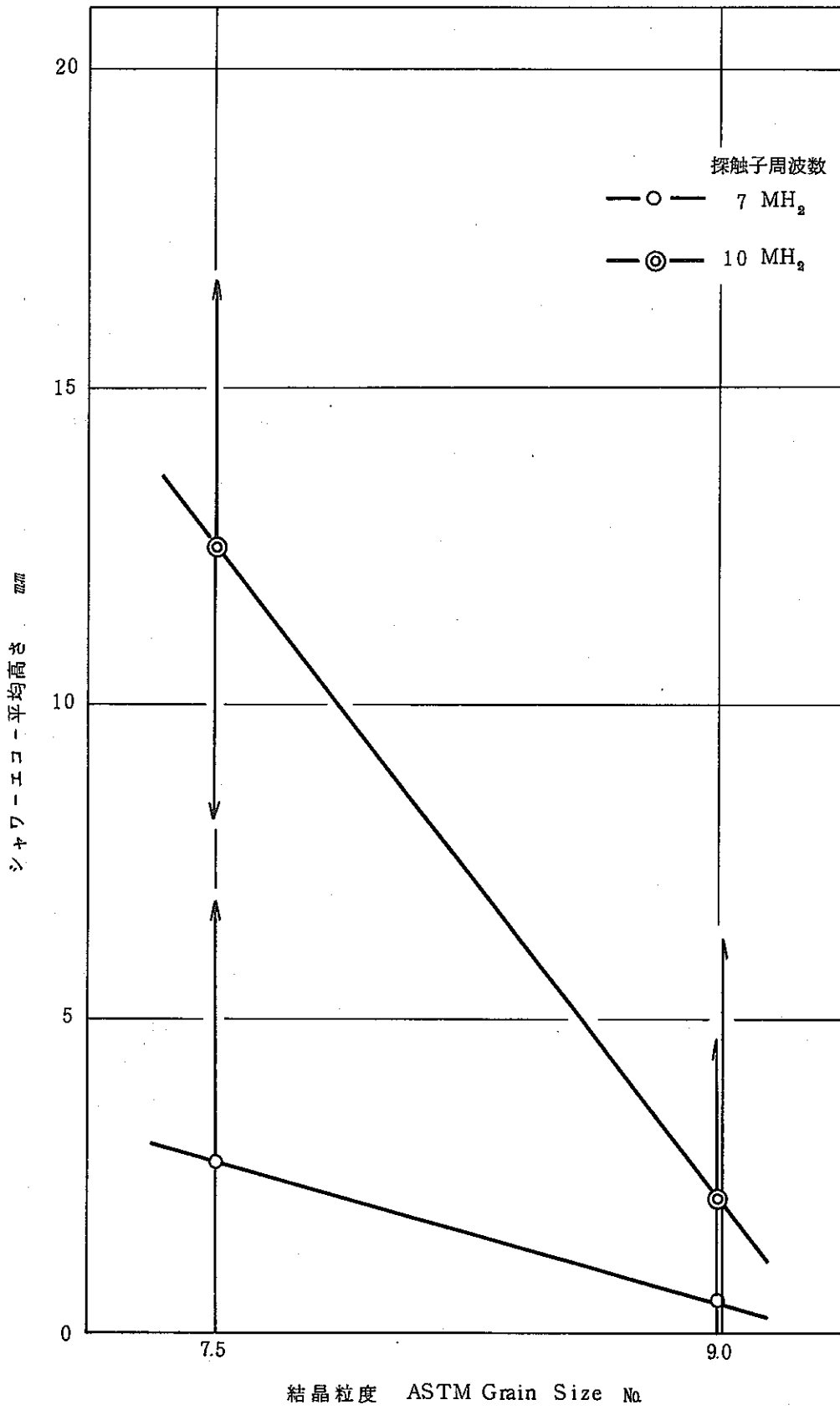


図4.16 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と探触子周波数の関係 (周方向欠陥探傷法)

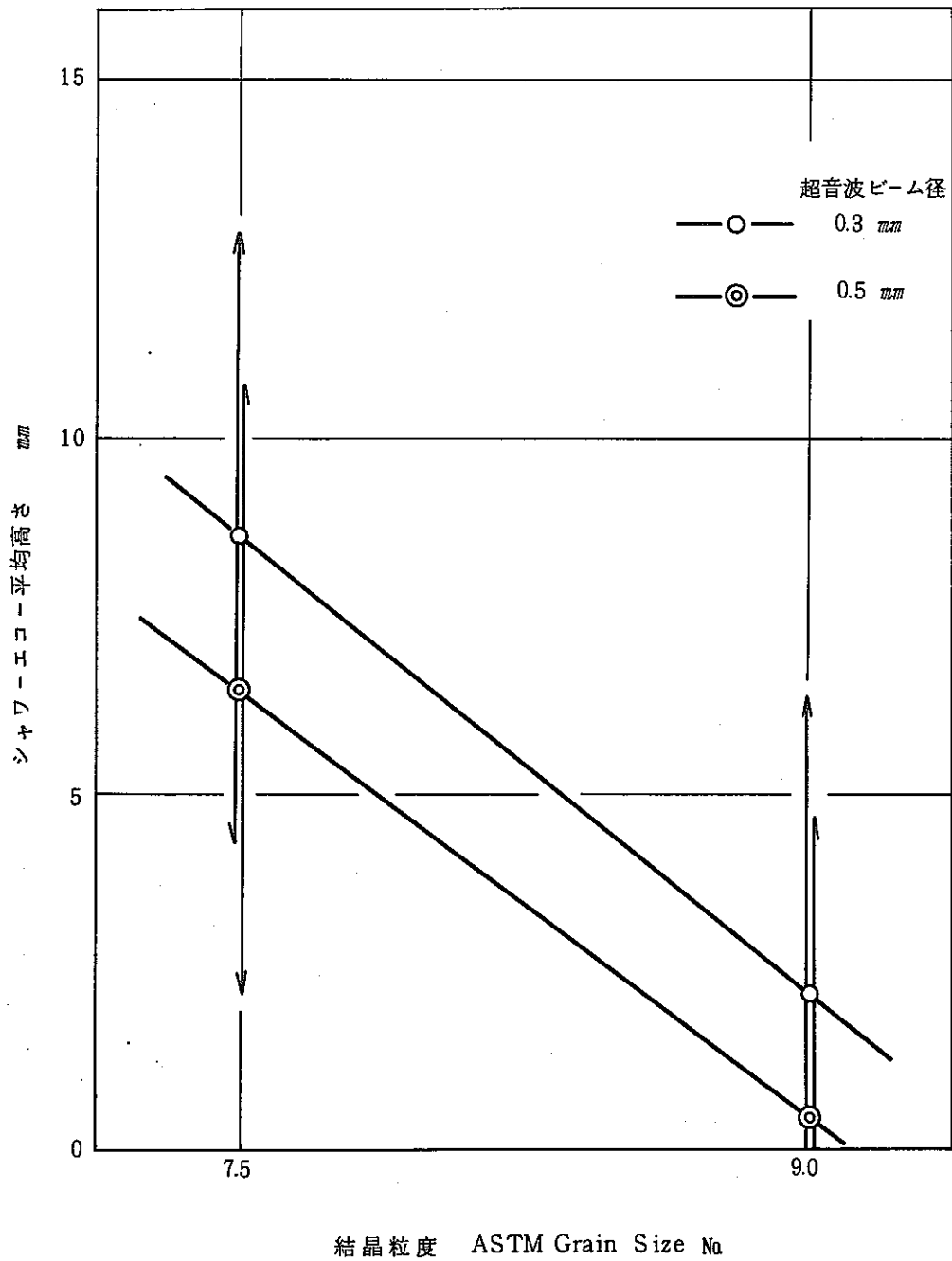


図 4.17 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と超音波ビーム径の関係 (周方向欠陥探傷法)

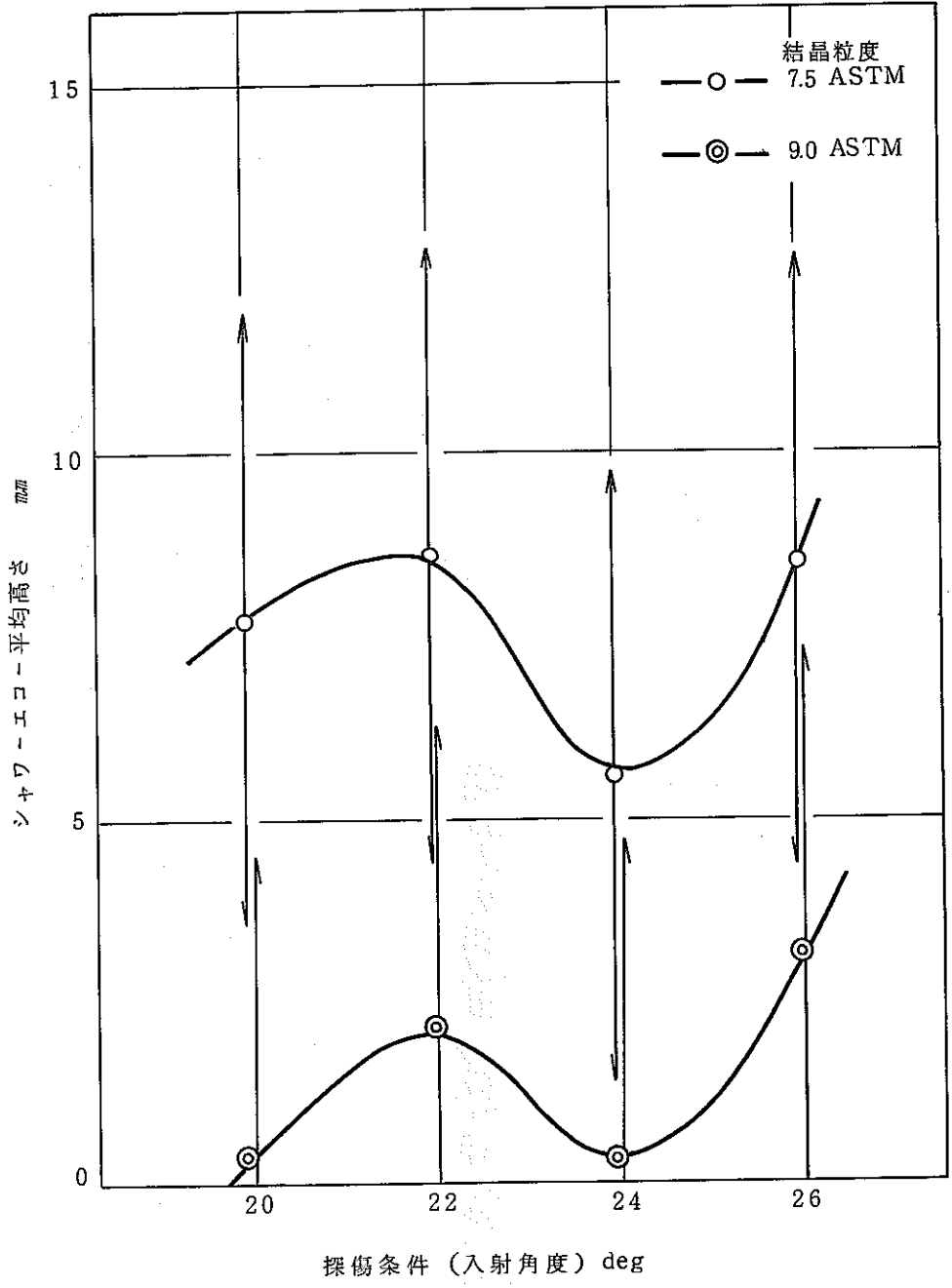


図 4.18 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と探傷条件の関係
(周方向欠陥傷法)

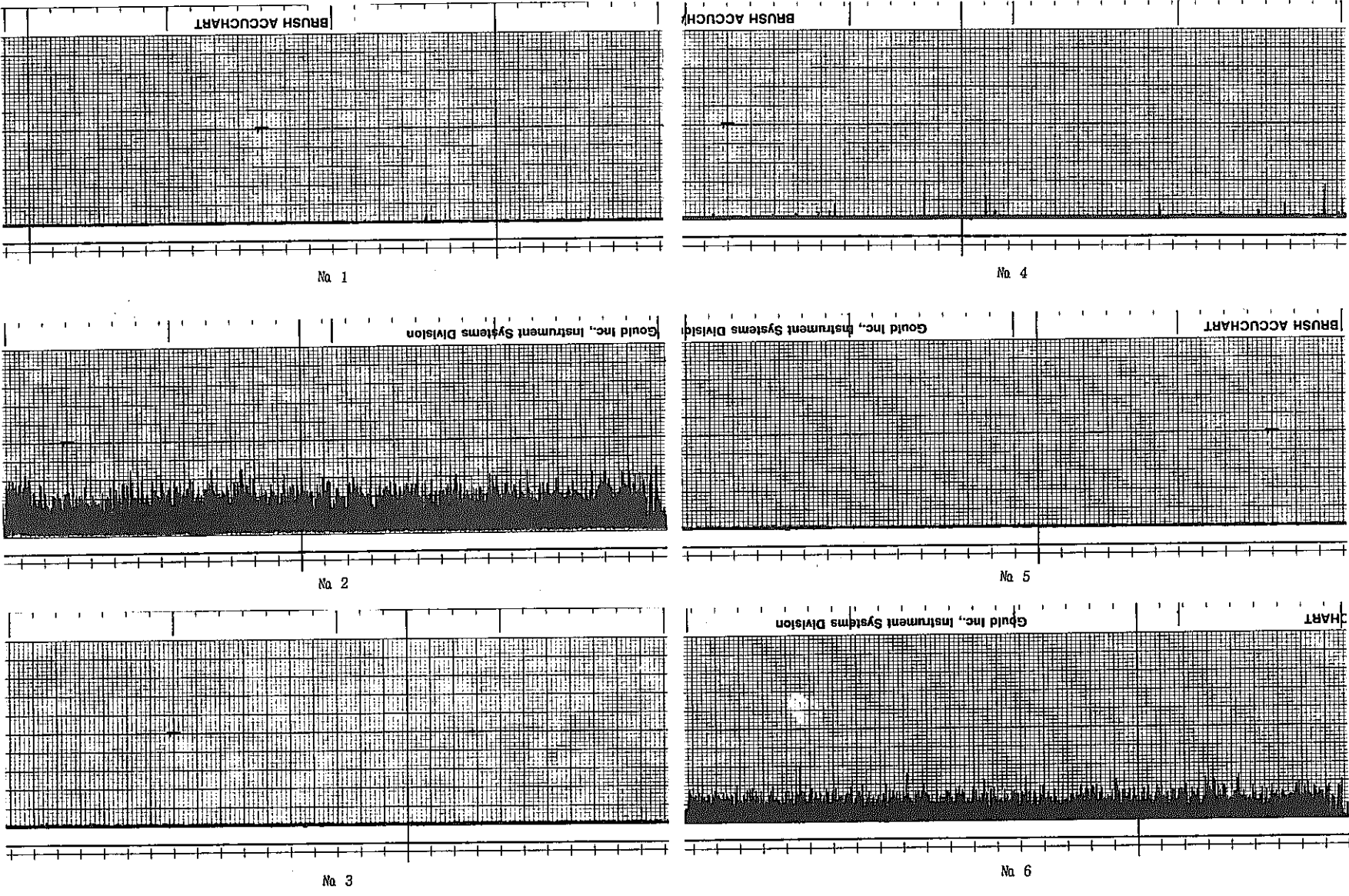
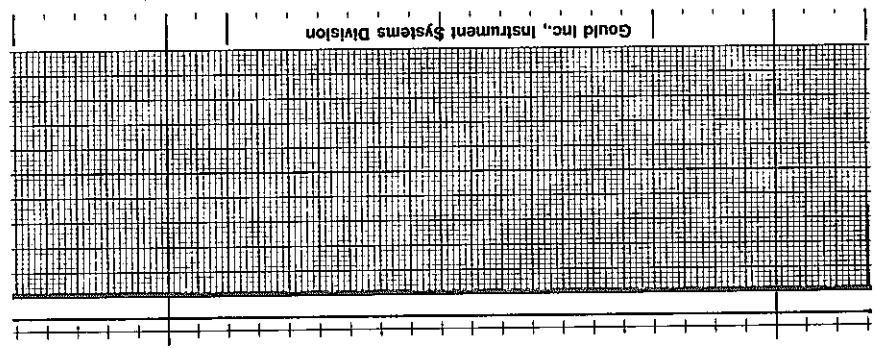
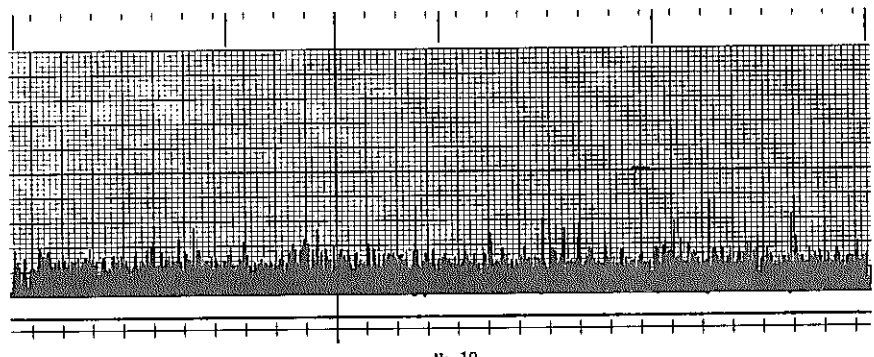


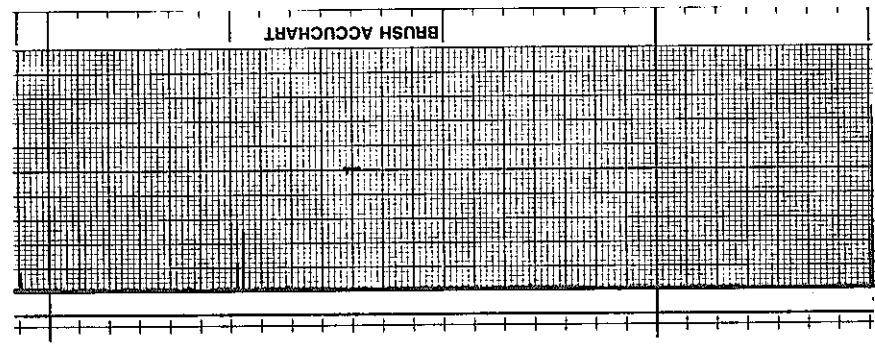
図 4.19 軸方向探傷記録 (その1)



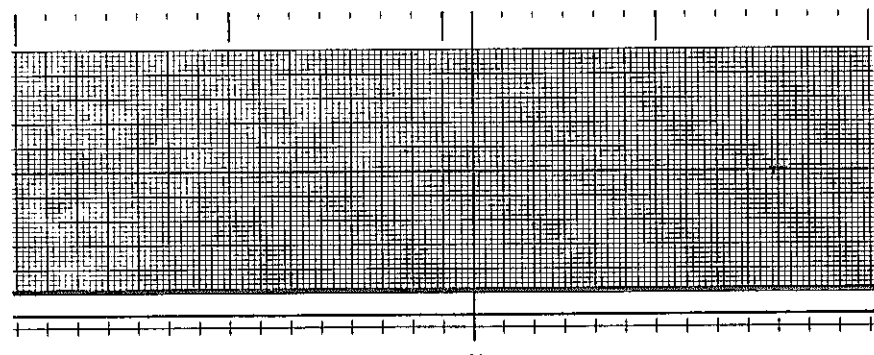
No 7



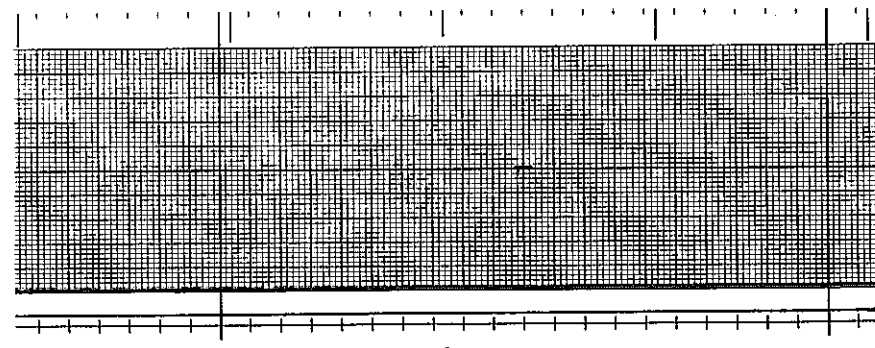
No 10



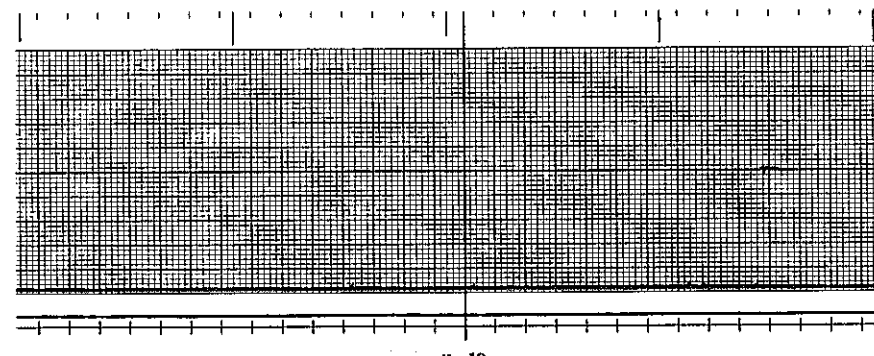
No 8



No 11

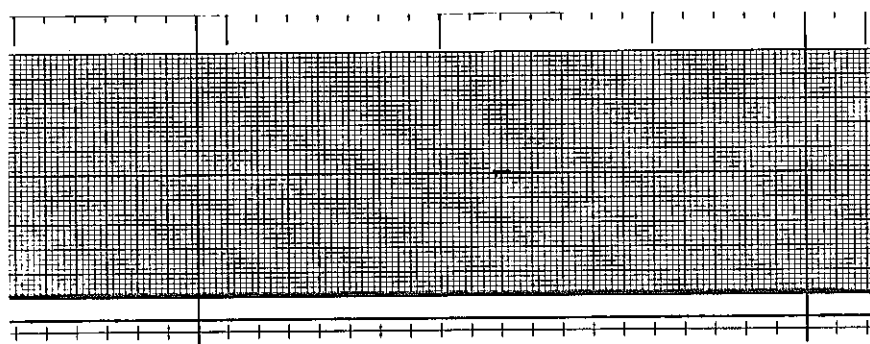


No 9

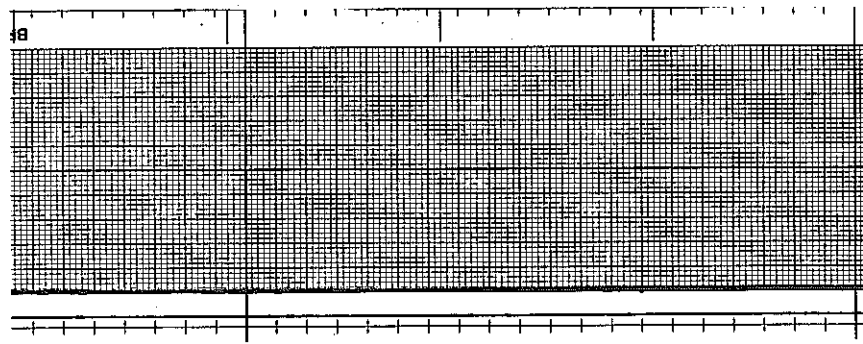


No 12

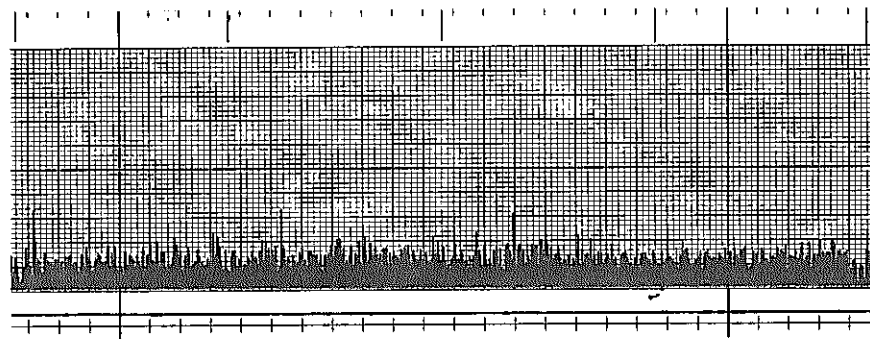
図 4.19 軸方向探傷記録 (その2)



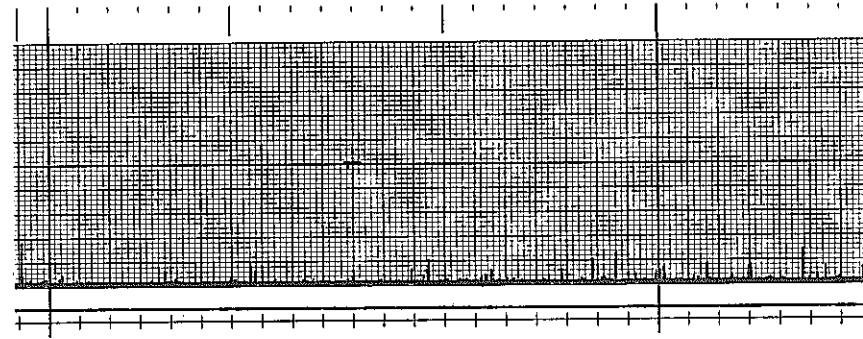
No. 13



No. 15



No. 14



No. 16

図 4.19 軸方向探傷記録 (その3)

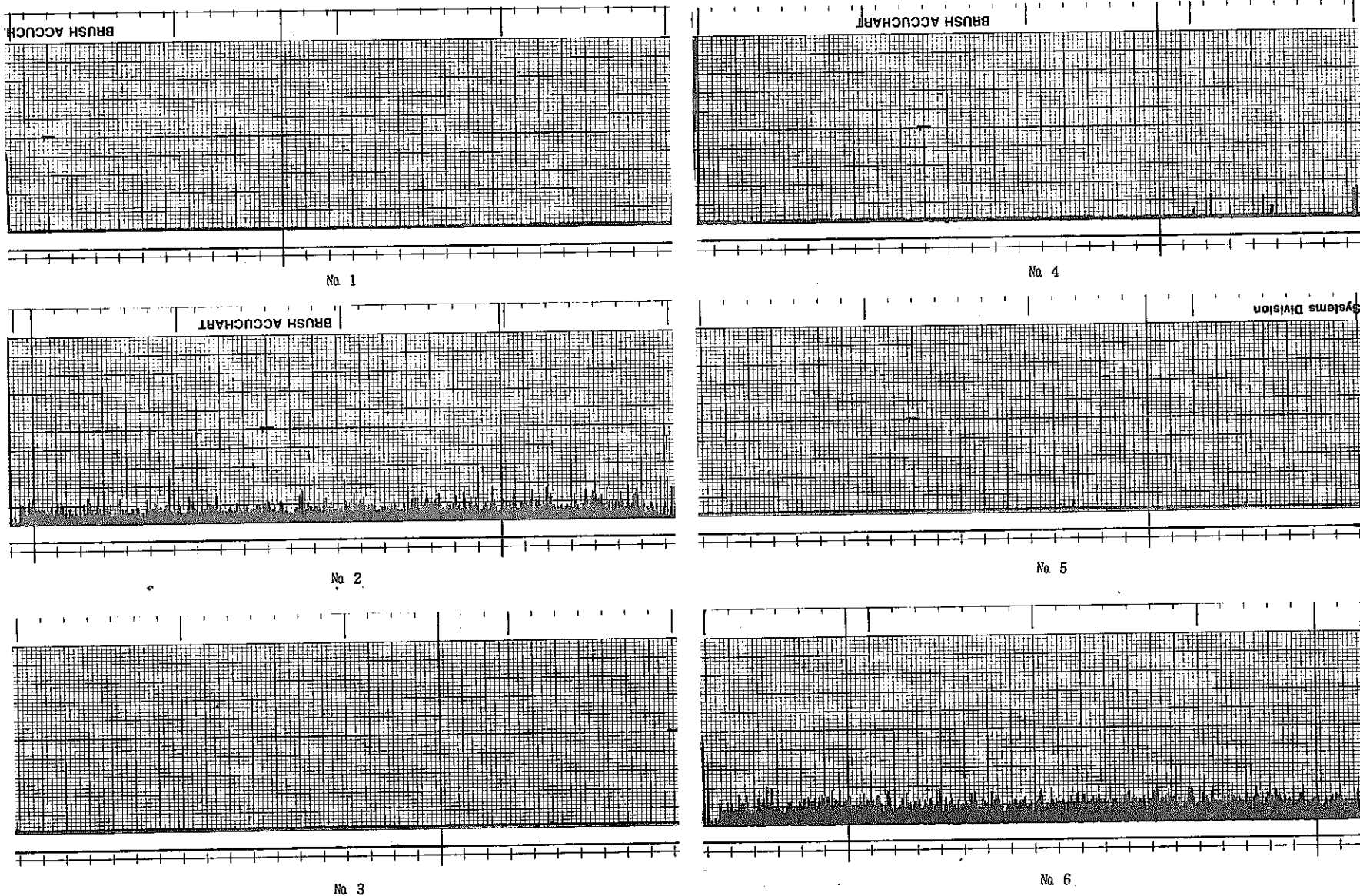


図 4.20 周方向探傷記録 (その1)

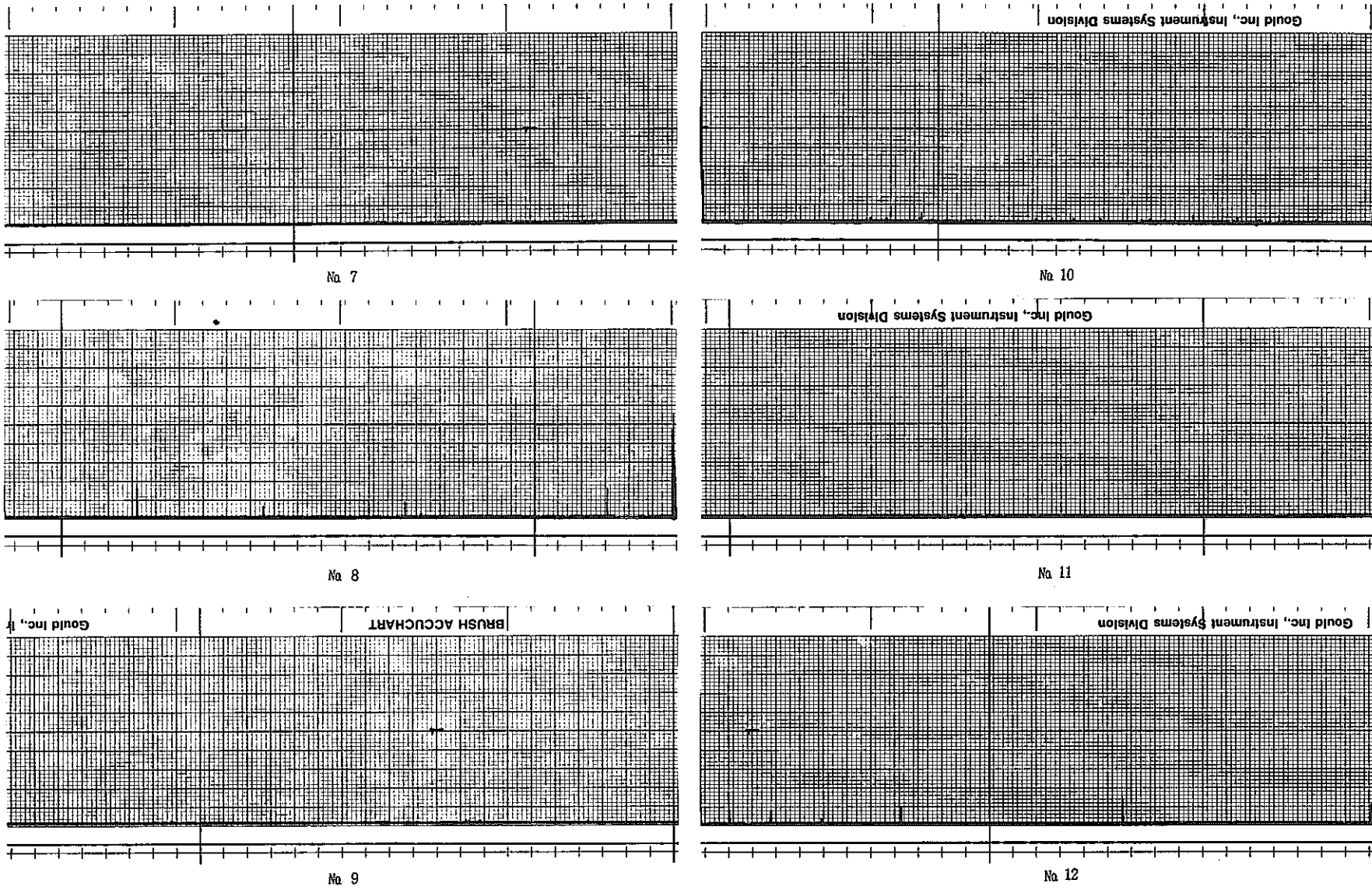
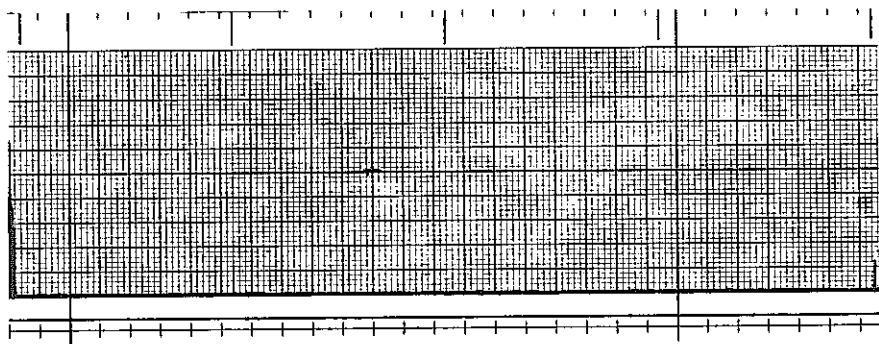
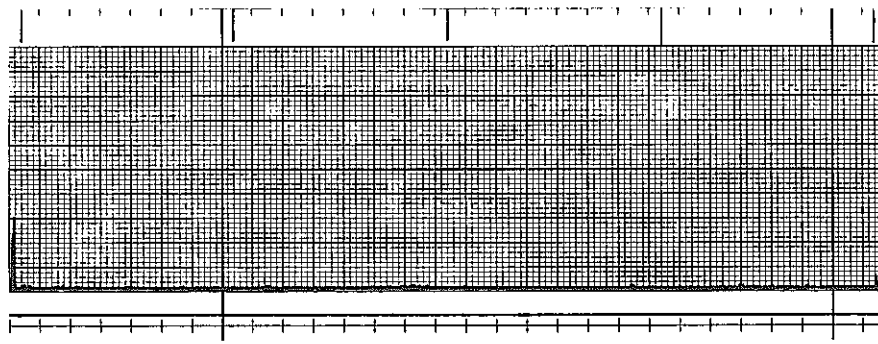


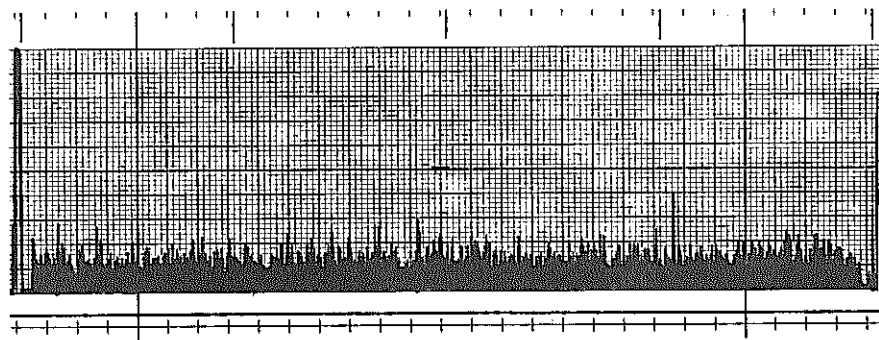
図 4.20 周方向探傷記録 (その2)



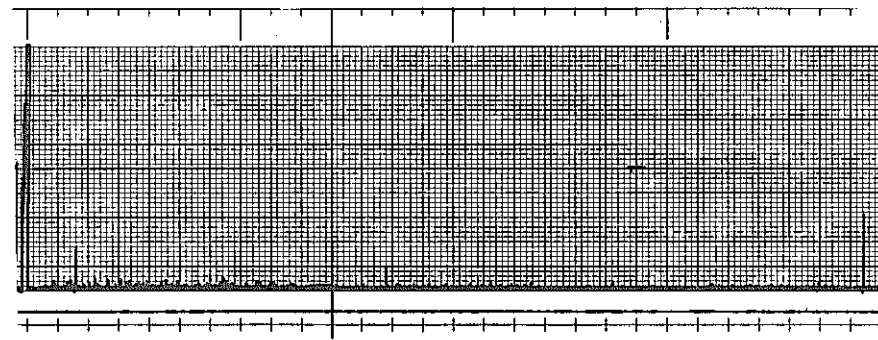
No. 13



No. 15



No. 14



No. 16

図 4. 20 周方向探傷記録 (その 3)

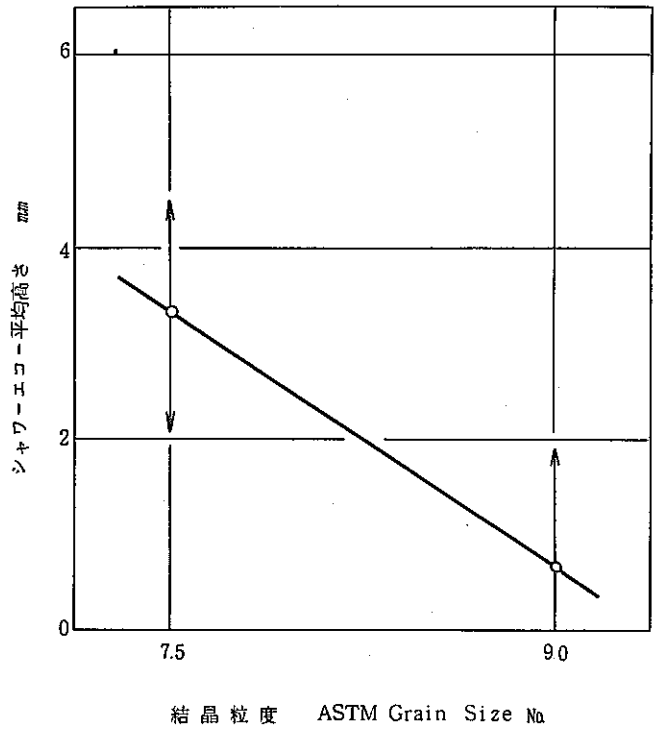


図 4.2.1 結晶粒度とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

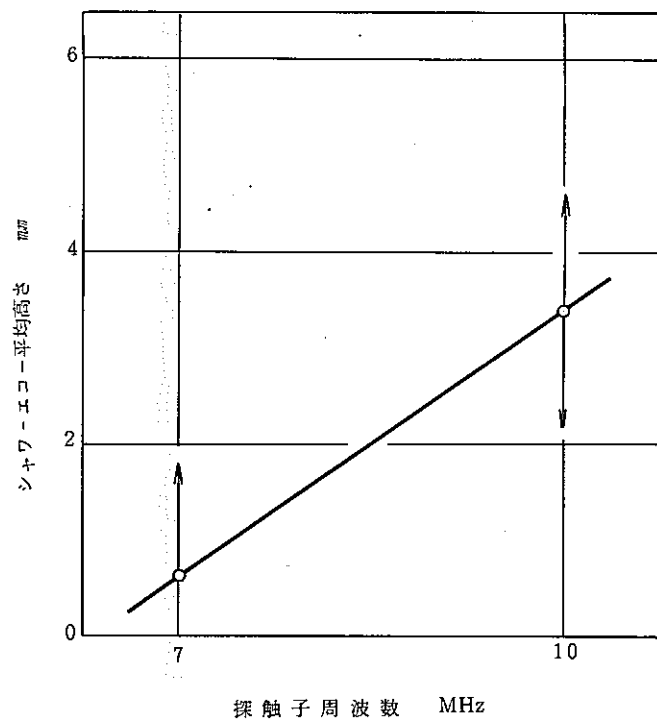


図 4.2.2 探触子周波数とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

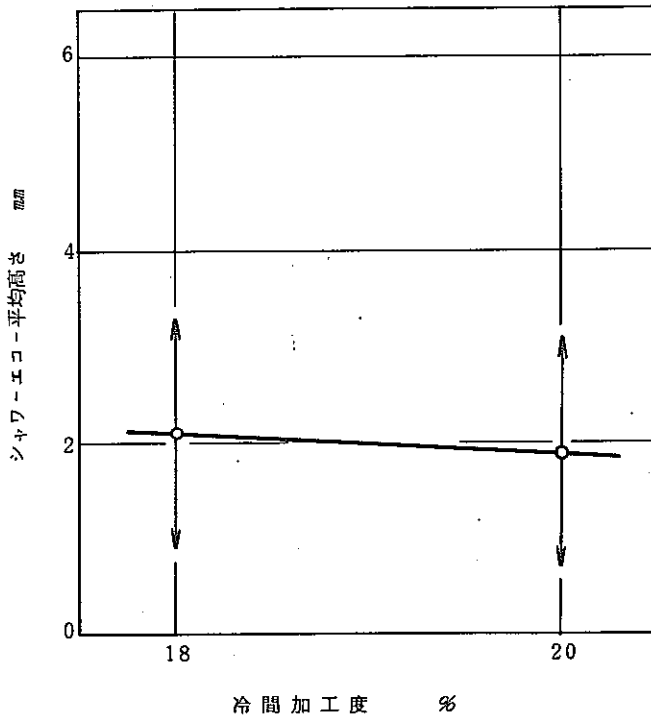


図 4.23 冷間加工度とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

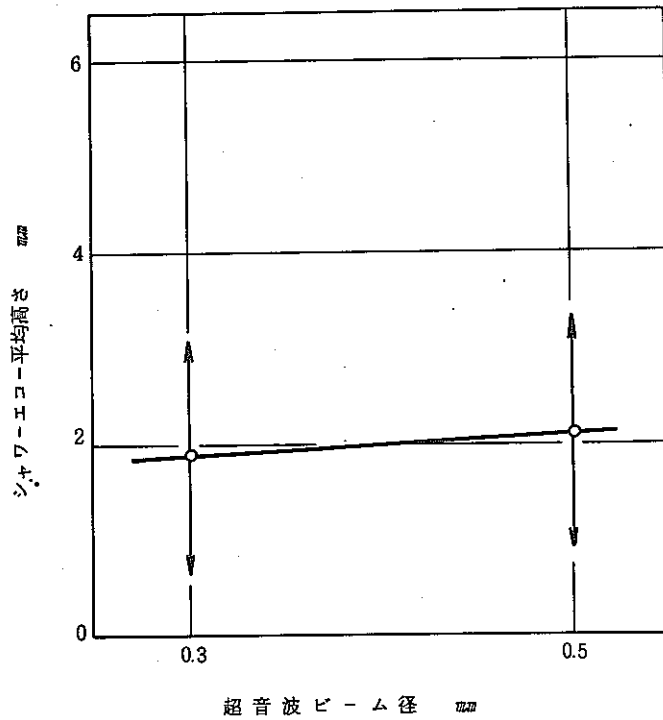


図 4.24 超音波ビーム径とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

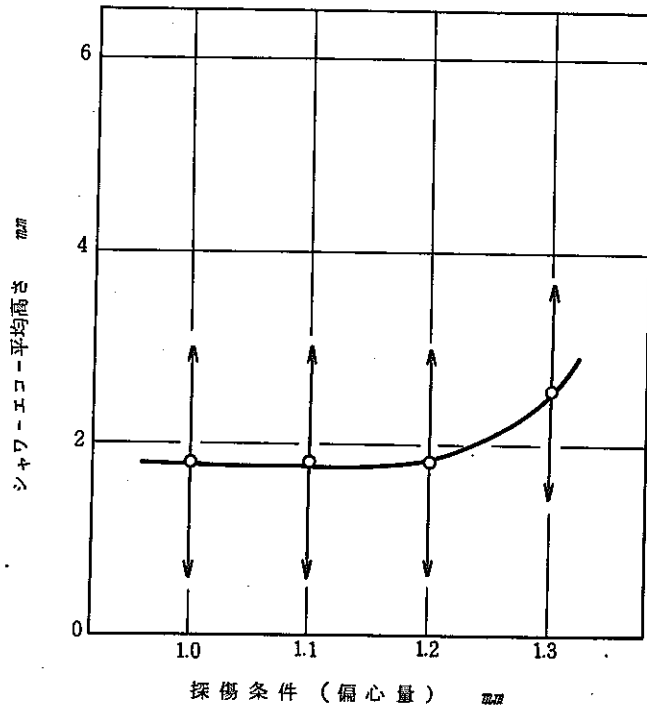


図 4.25 探傷条件とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

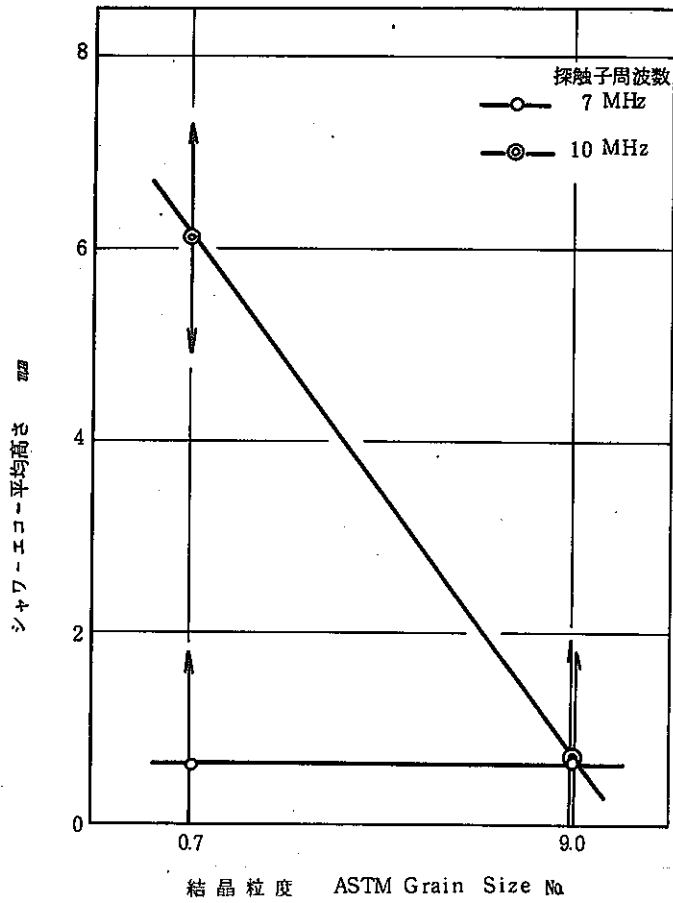


図 4.26 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と探触子周波数の関係
(軸方向欠陥探傷法)

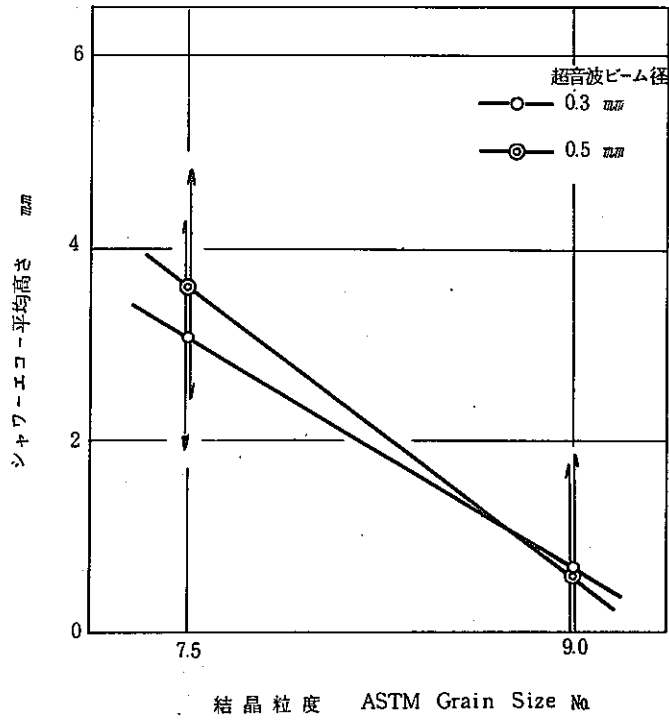


図 4.27 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と超音波ビーム径の関係 (軸方向欠陥探傷法)

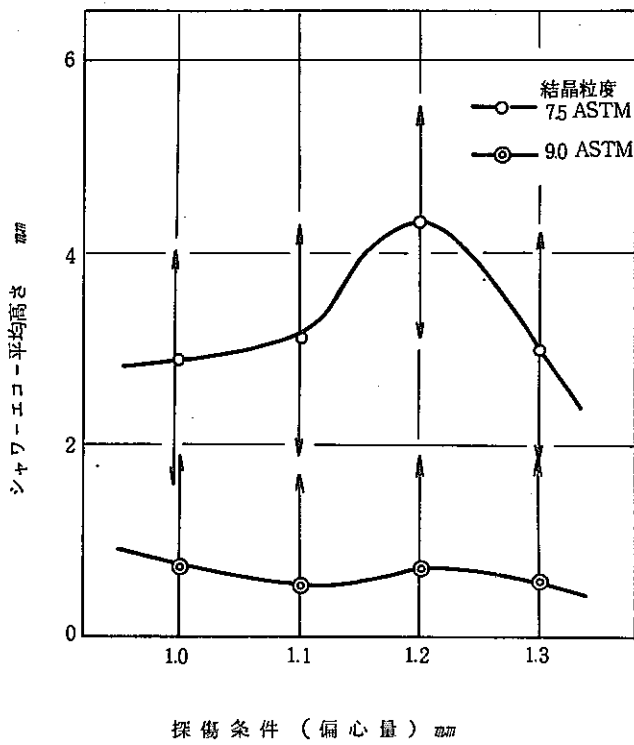


図 4.28 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と探傷条件の関係 (軸方向欠陥探傷法)

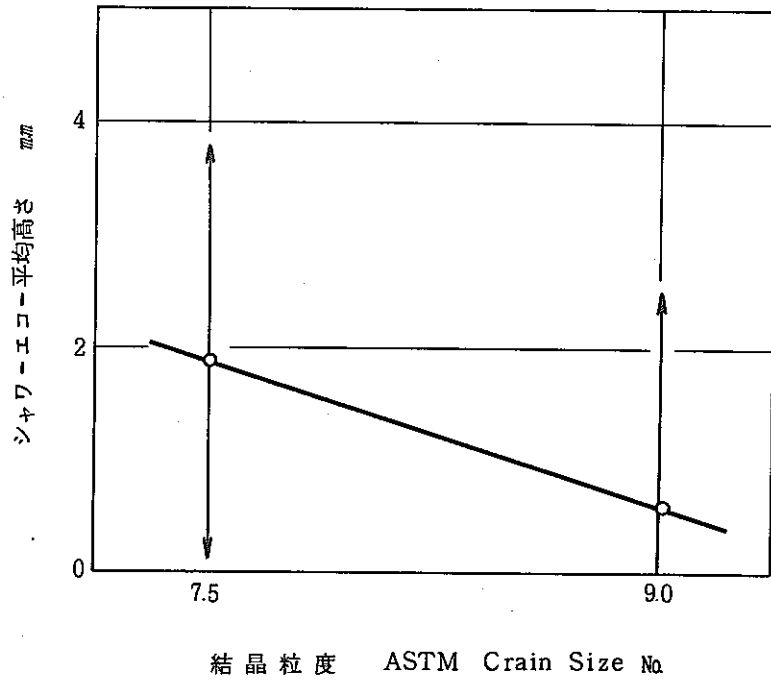


図 4.29 結晶粒度とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

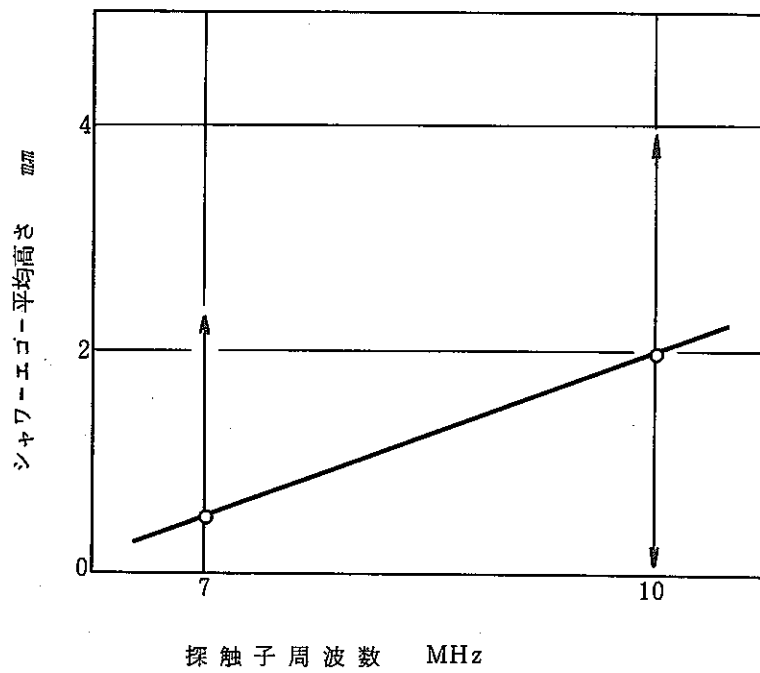


図 4.30 探触子周波数とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

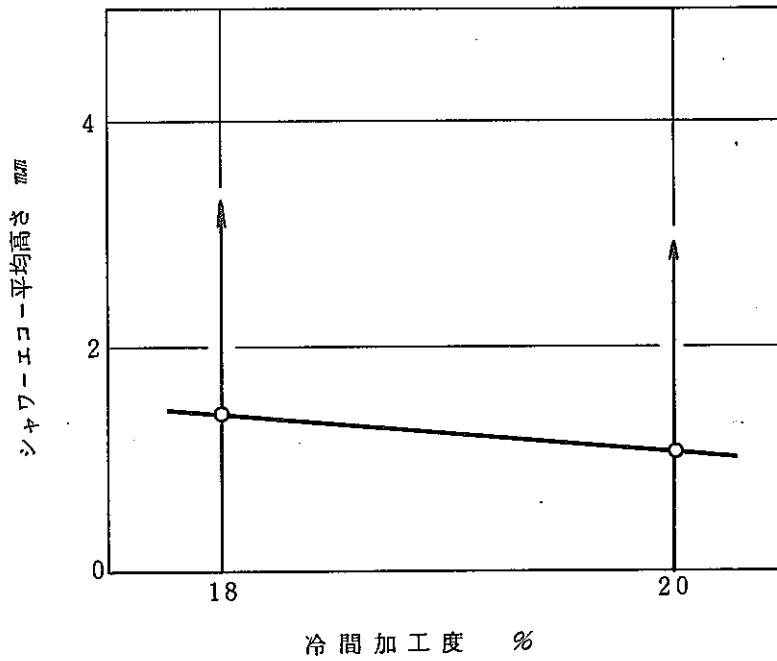


図 4.31 冷間加工度とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

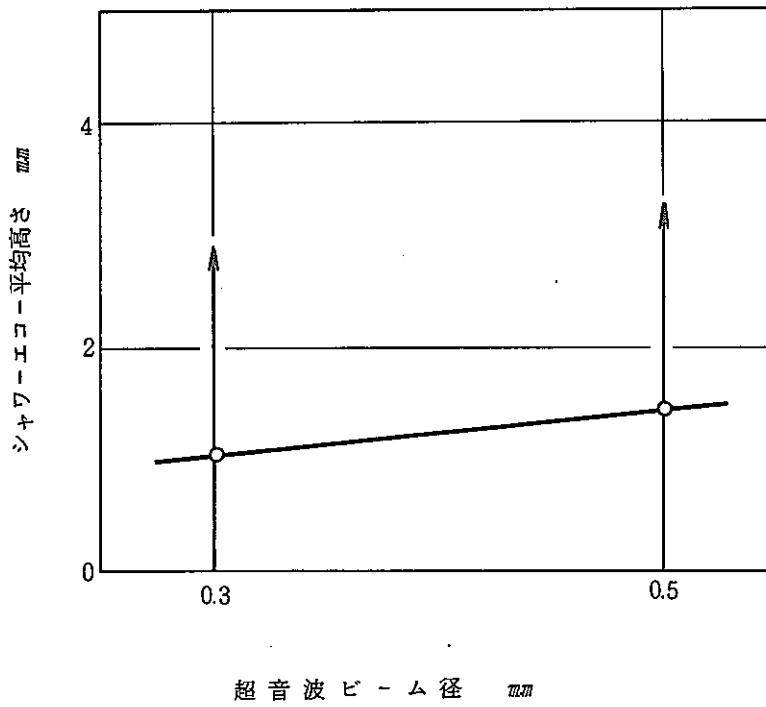


図 4.32 超音波ビーム径とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

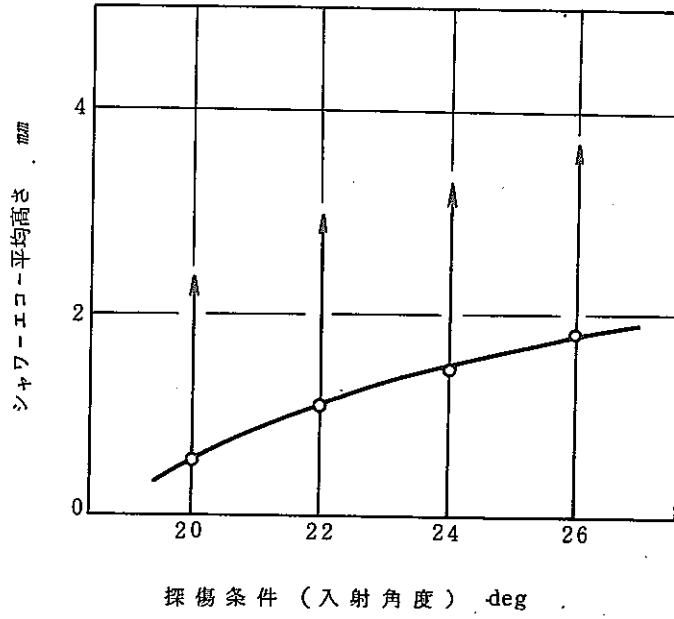


図 4.33 探傷条件とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

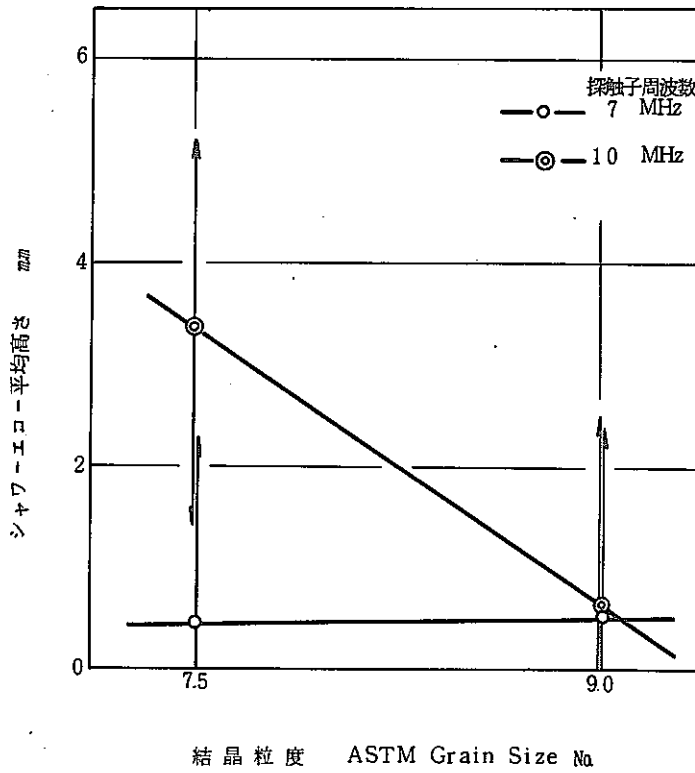


図 4.34 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と探触子周波数の関係
(周方向欠陥探傷法)

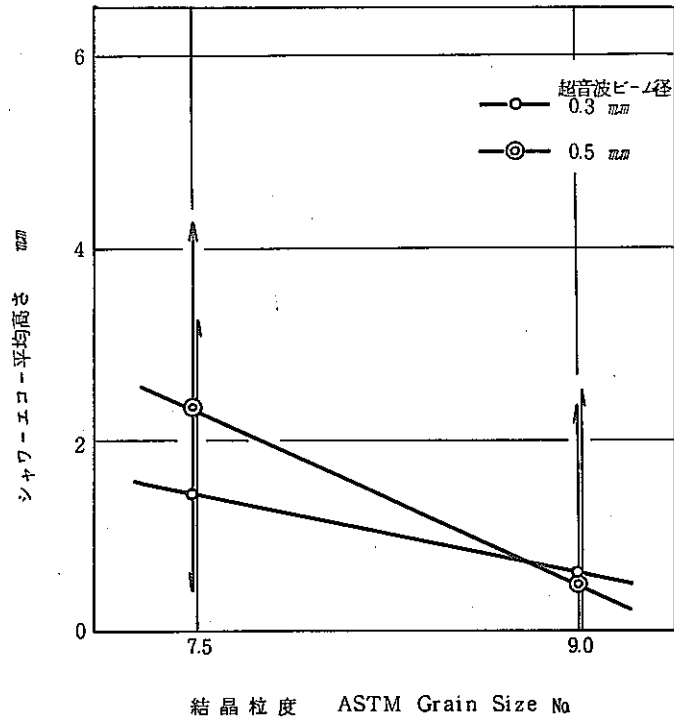


図 4.35 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と超音波ビーム径の関係 (周方向欠陥探傷法)

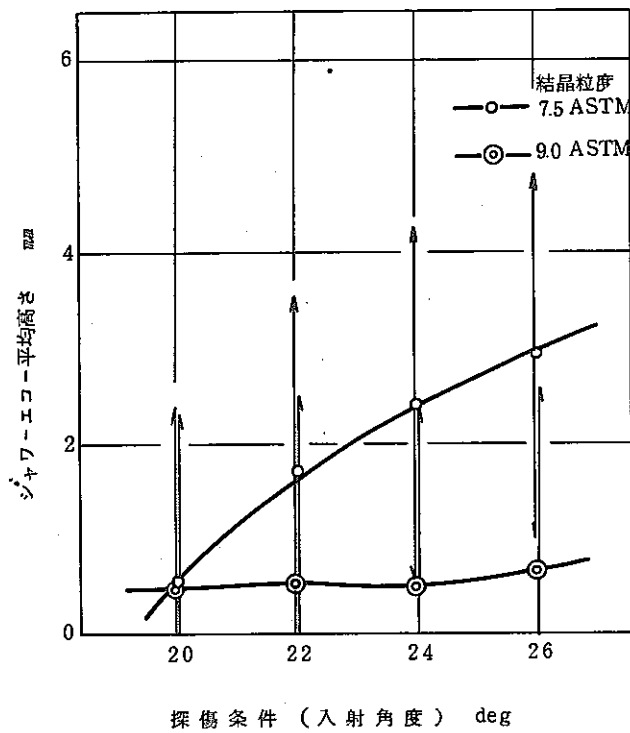
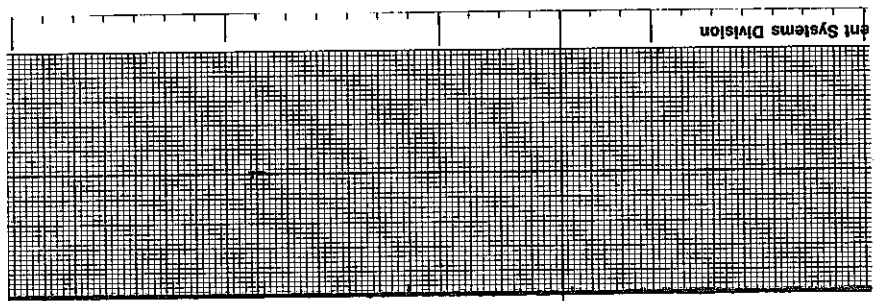
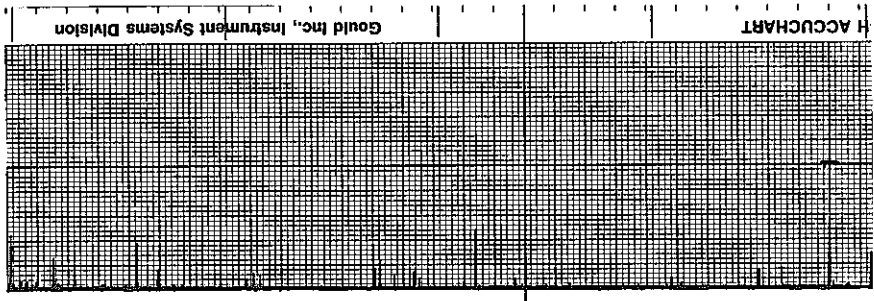


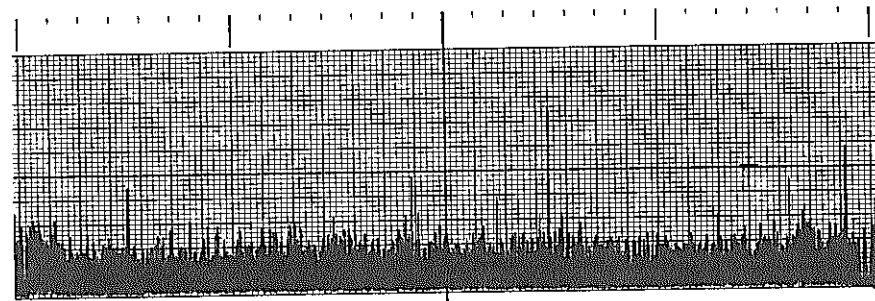
図 4.36 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と探傷条件 (周方向欠陥探傷法)



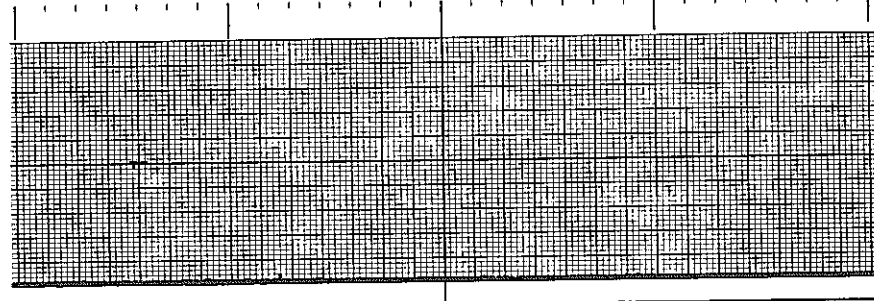
No. 1



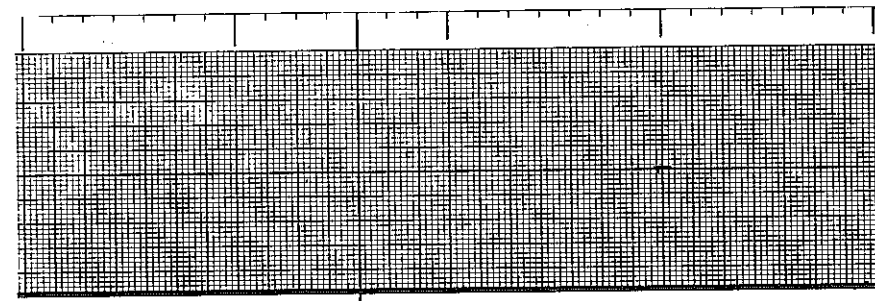
No. 4



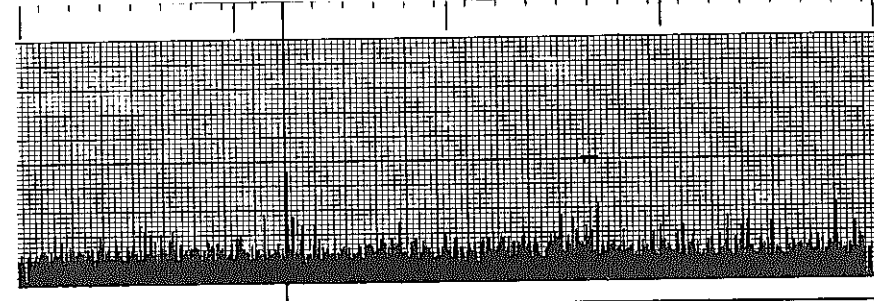
No. 2



No. 5

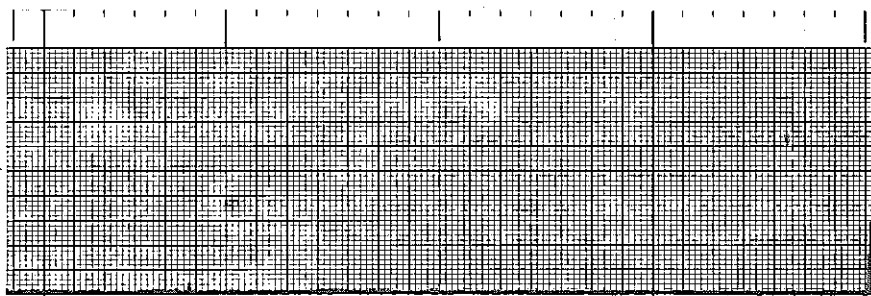


No. 3

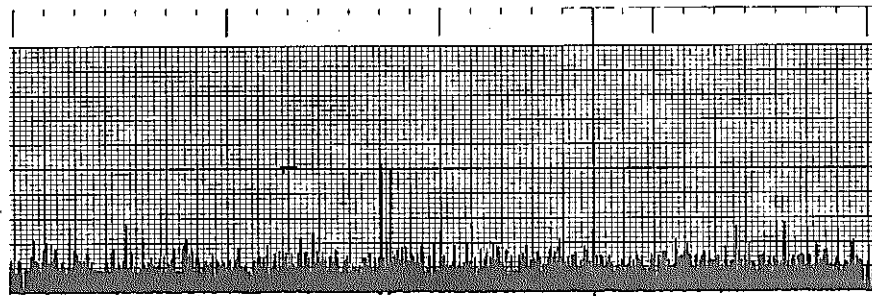


No. 6

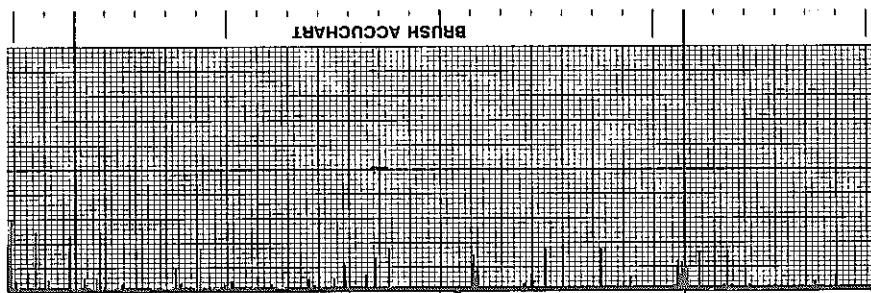
図 4.37 軸方向探傷記録 (その1)



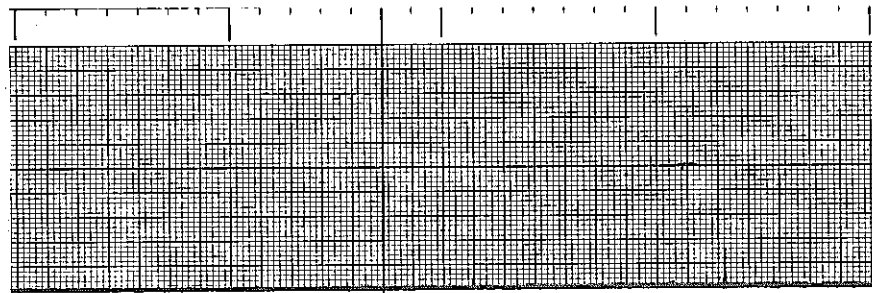
No 7



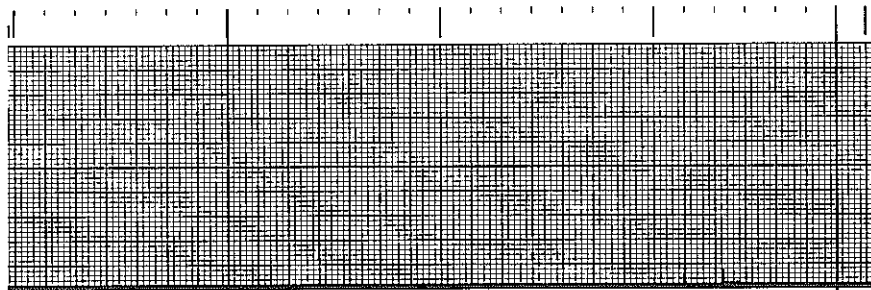
No 10



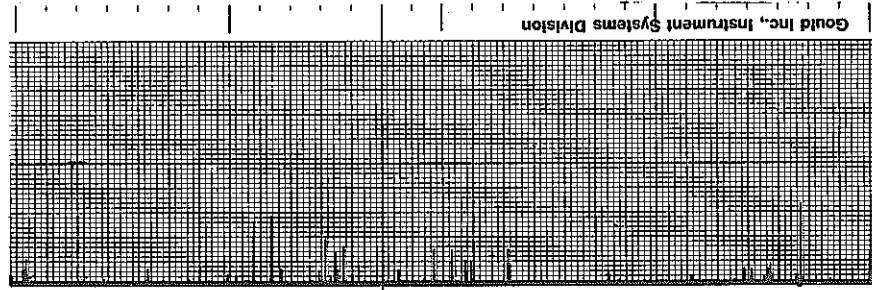
No 8



No 11



No 9



No 12

図 4.37 軸方向探傷記録 (その2)

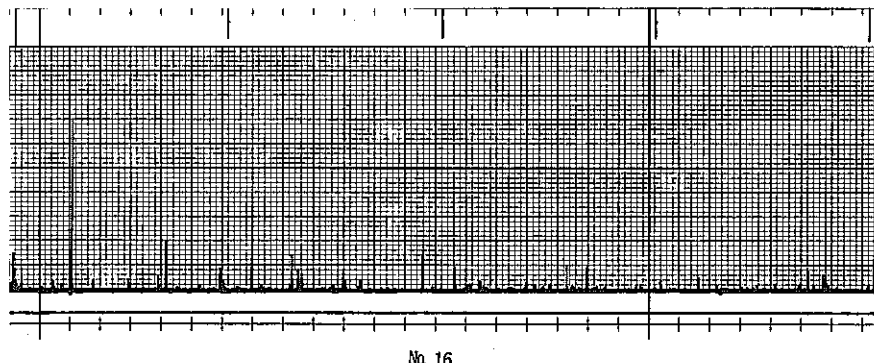
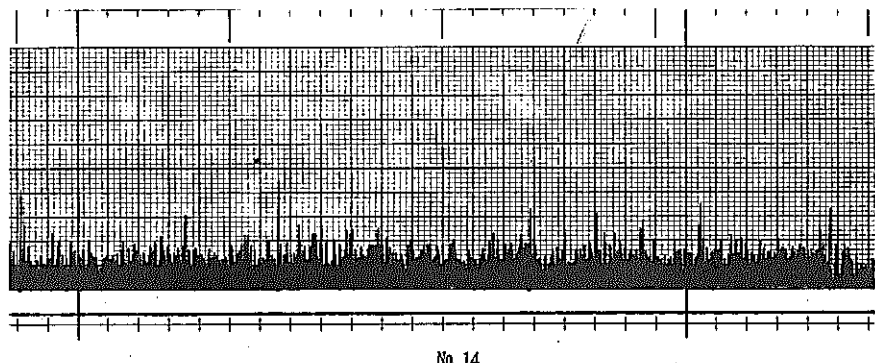
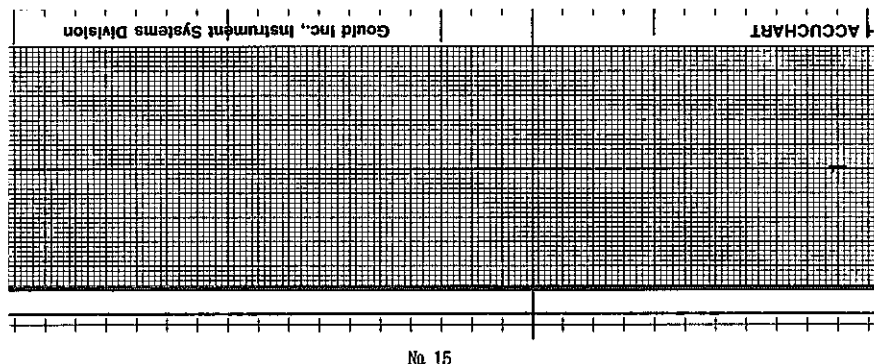
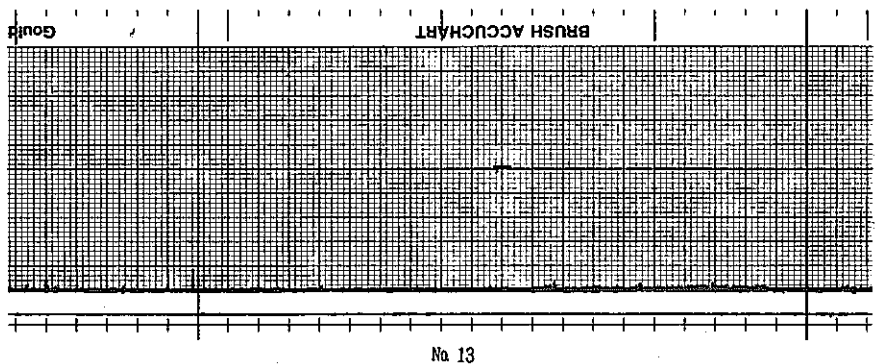
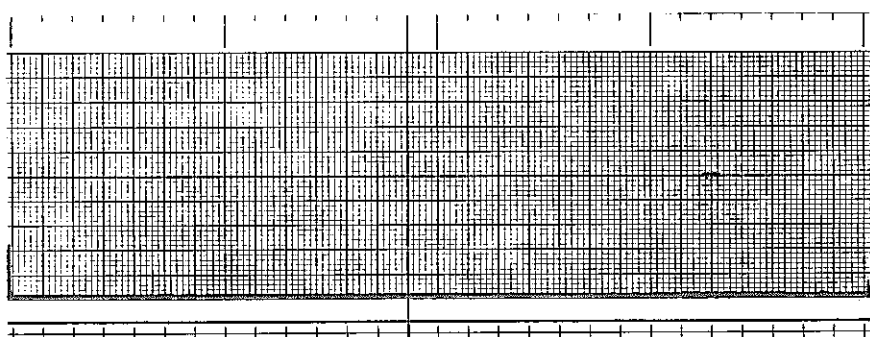
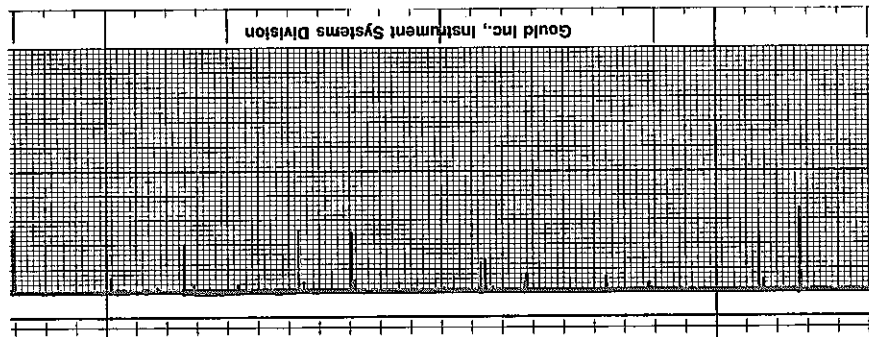


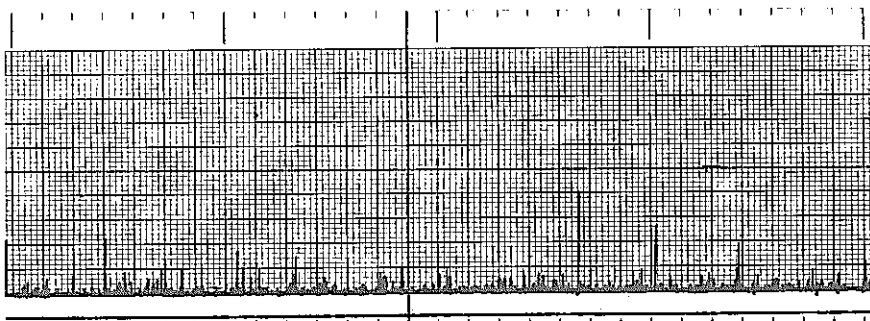
図 4.37 軸方向探傷記録 (その3)



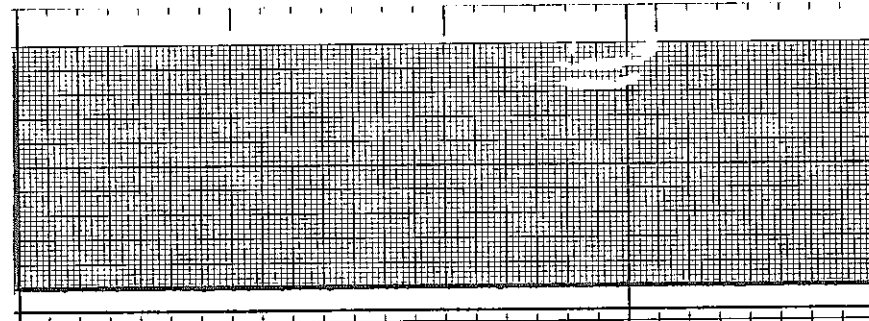
No. 1



No. 4



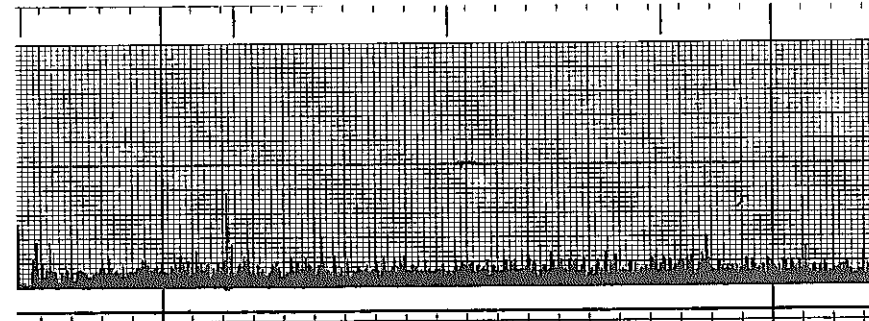
No. 2



No. 5



No. 3



No. 6

図 4.38 周方向探傷記録 (その1)

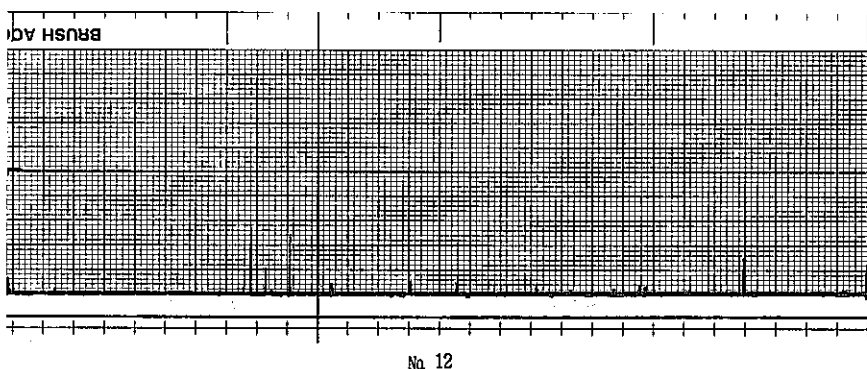
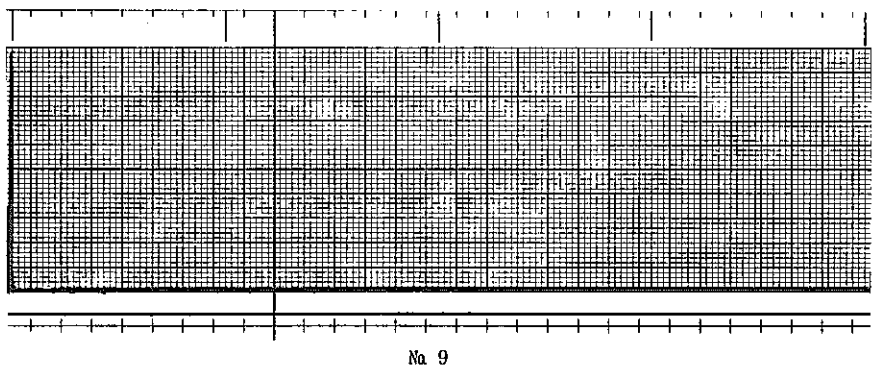
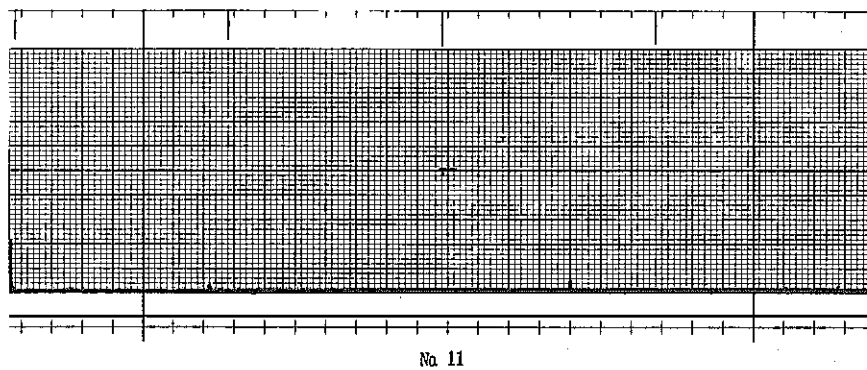
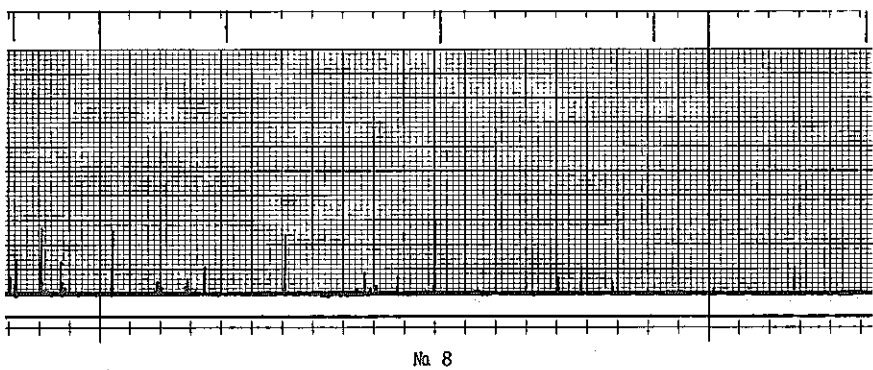
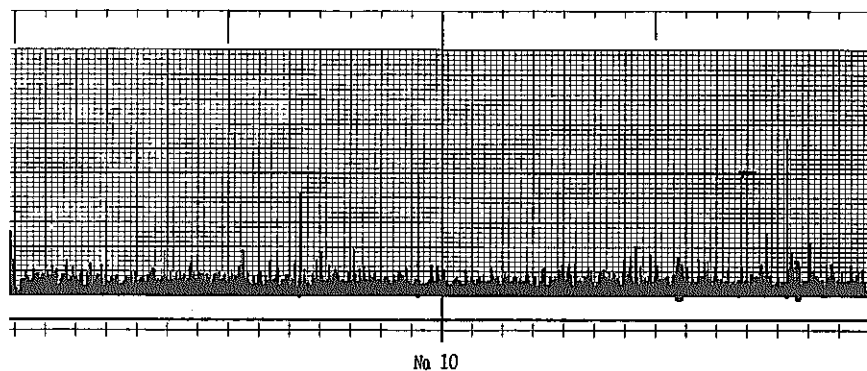
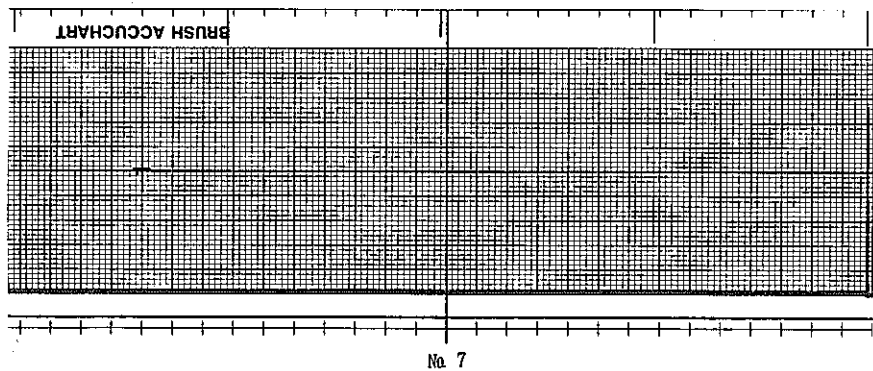
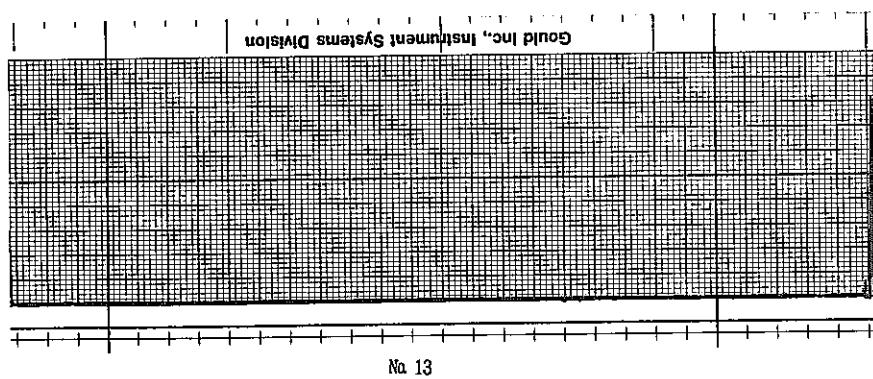
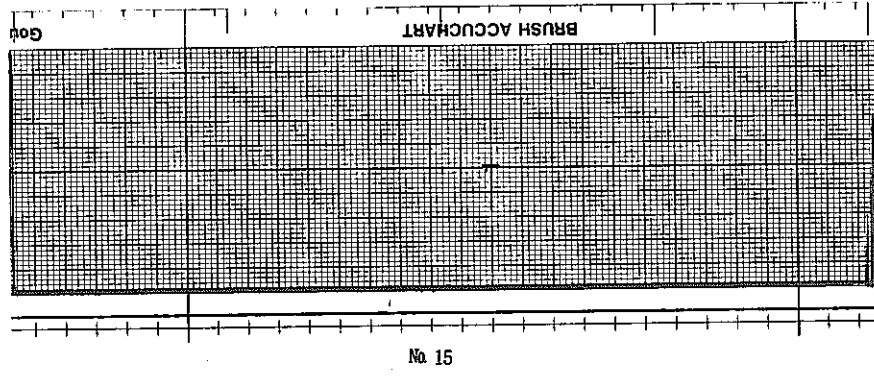


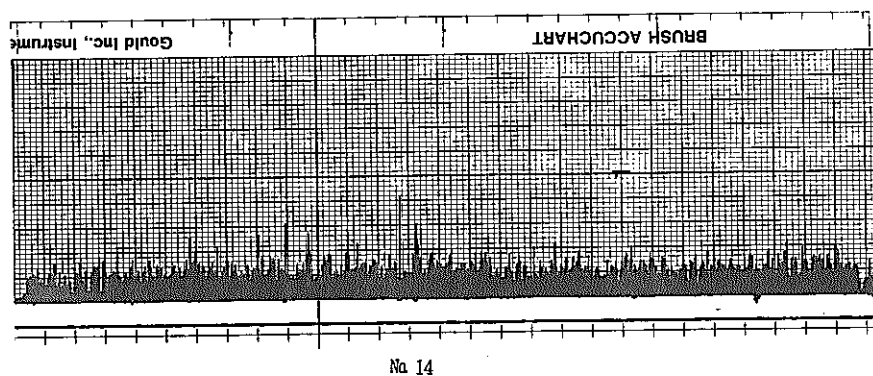
図 4.38 周方向探傷記録 (その2)



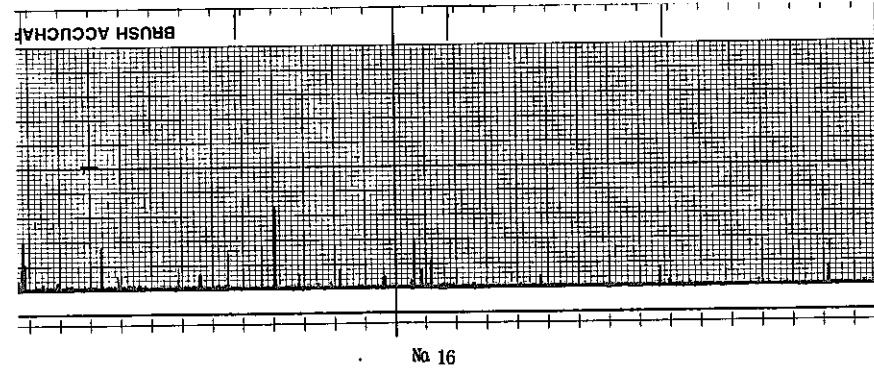
No 13



No 15



No 14



No 16

図 4. 38 周方向探傷記録 (その 3)

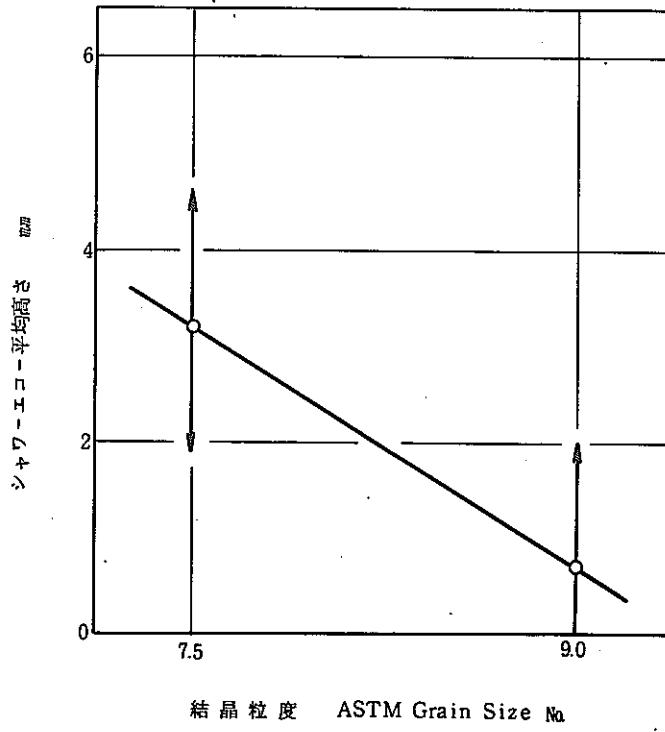


図 4.39 結晶粒度とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

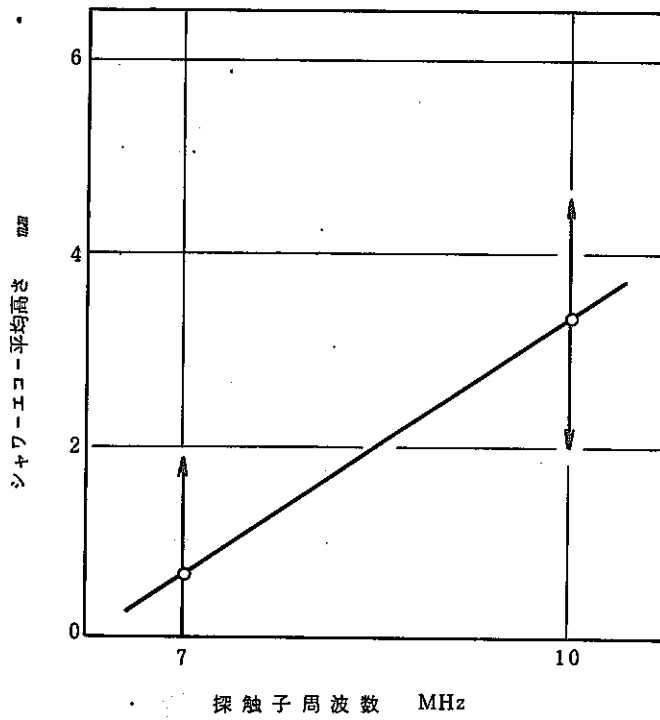


図 4.40 探触子周波数とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

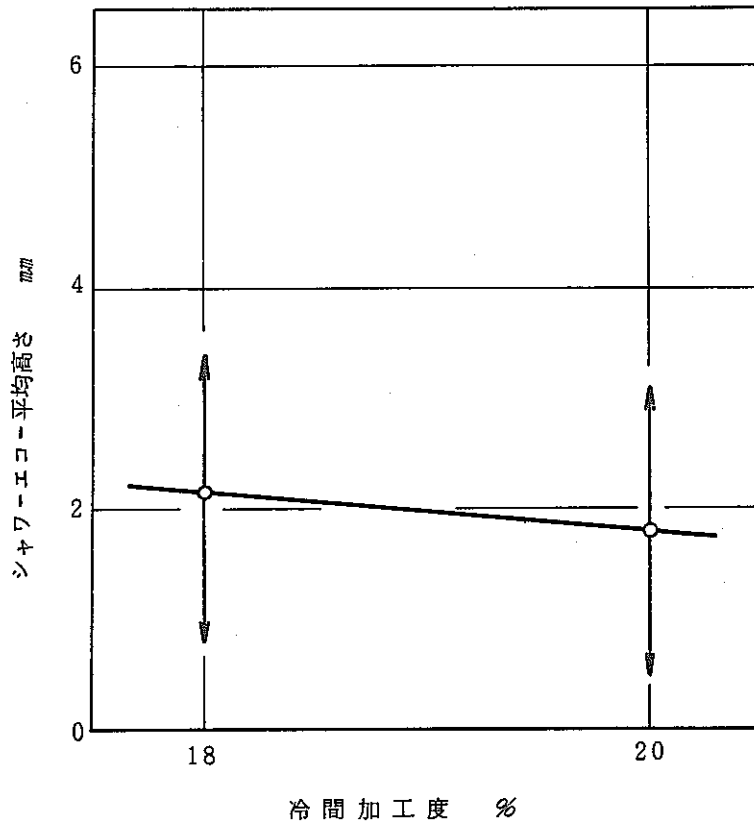


図 4.4.1 冷間加工度とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

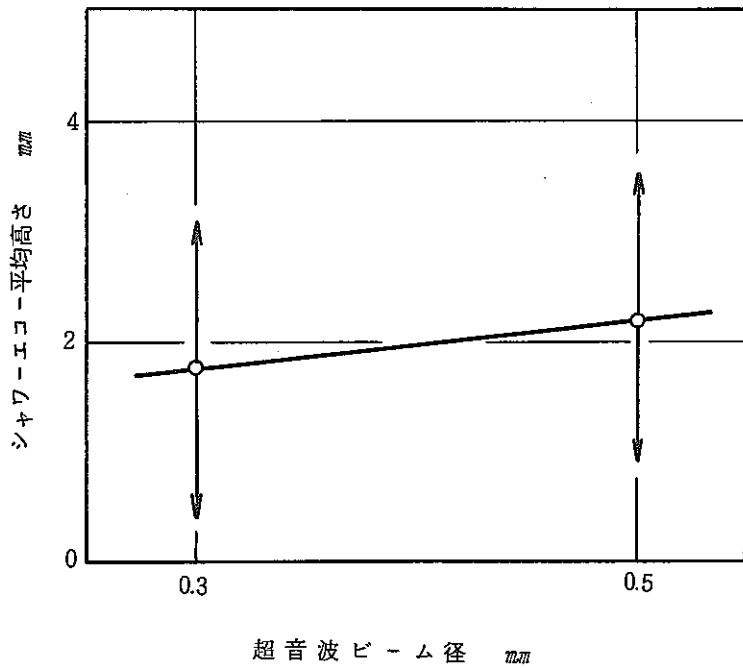


図 4.4.2 超音波ビーム径とシャワーエコー平均高さとの関係
(軸方向欠陥探傷法)

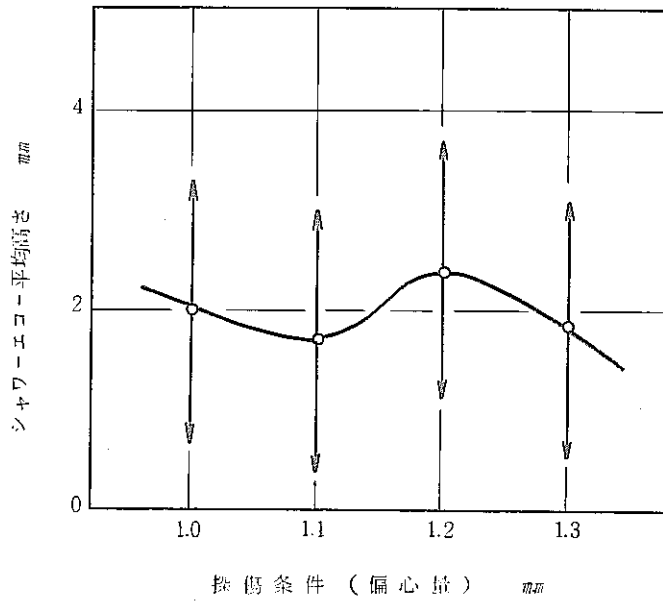


図 4.43 探傷条件とシャワーエコー平均高さとの関係 (軸方向欠陥探傷法)

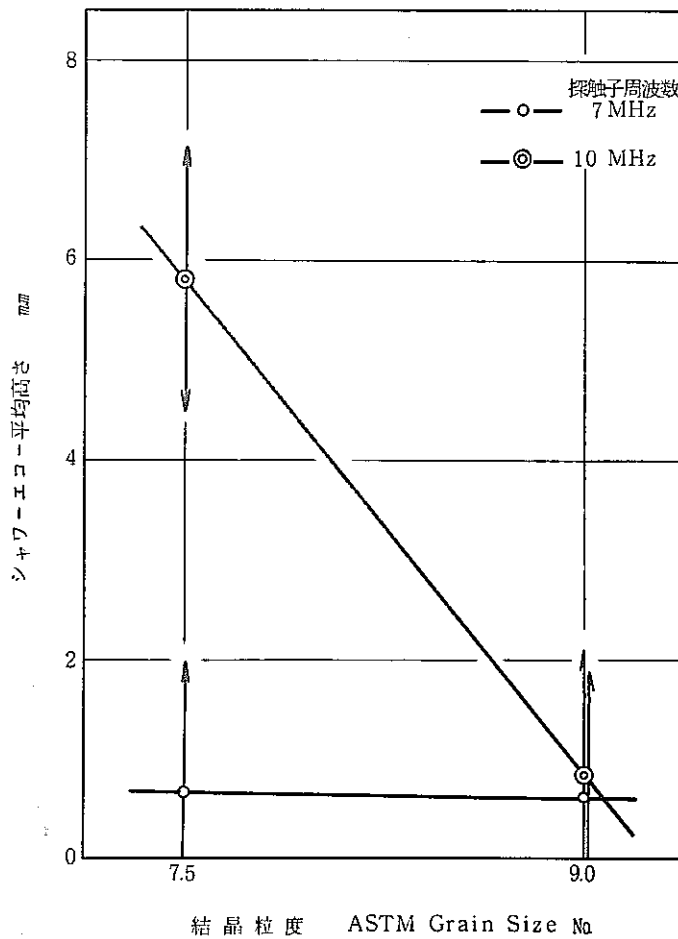


図 4.44 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と探触子周波数の関係 (軸方向欠陥探傷法)

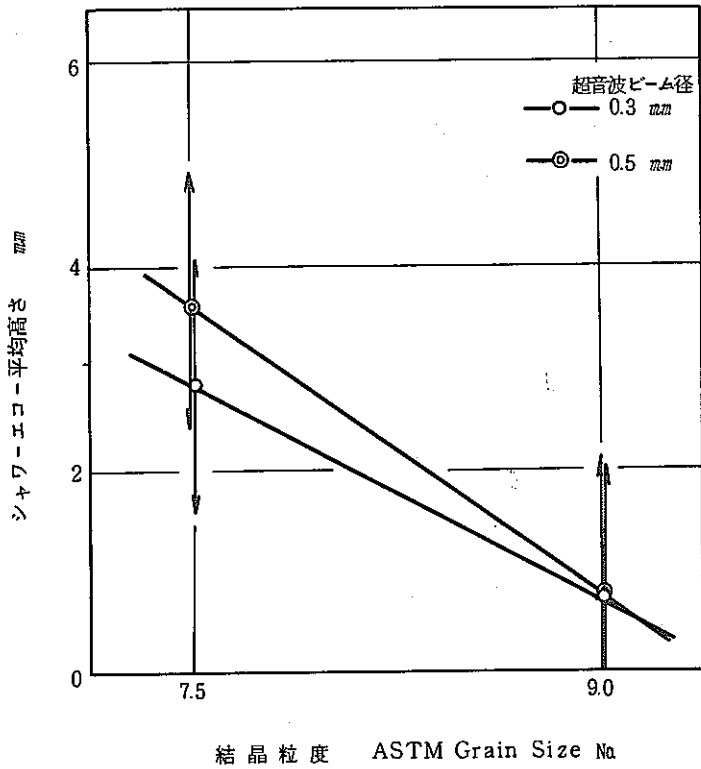


図 4.45 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と超音波ビーム径の関係 (軸方向欠陥探傷法)

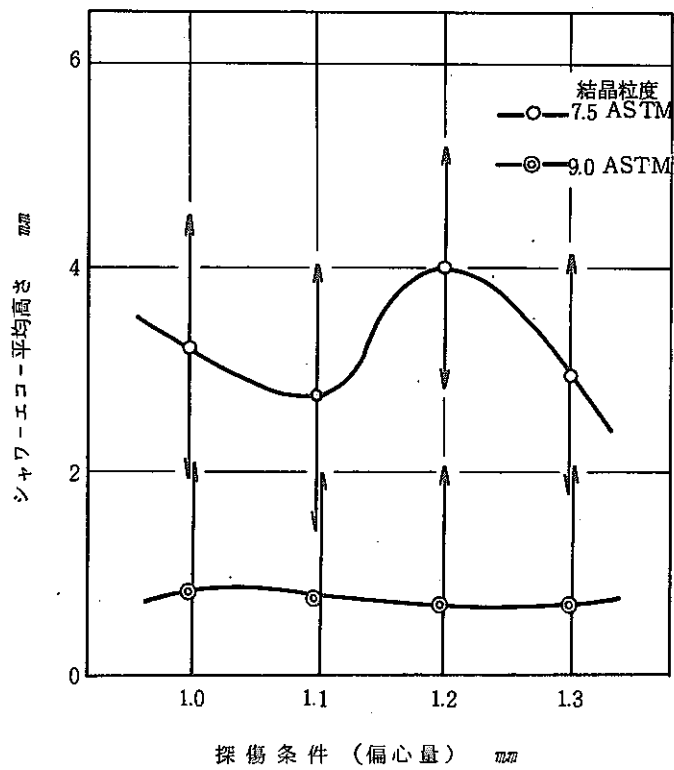


図 4.46 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と探傷条件の関係 (軸方向欠陥探傷法)

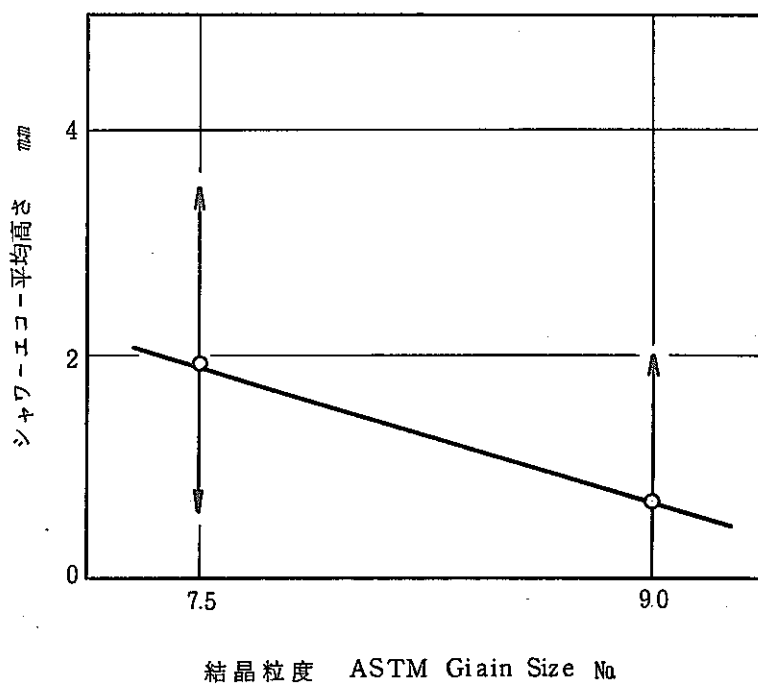


図 4.47 結晶粒度とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

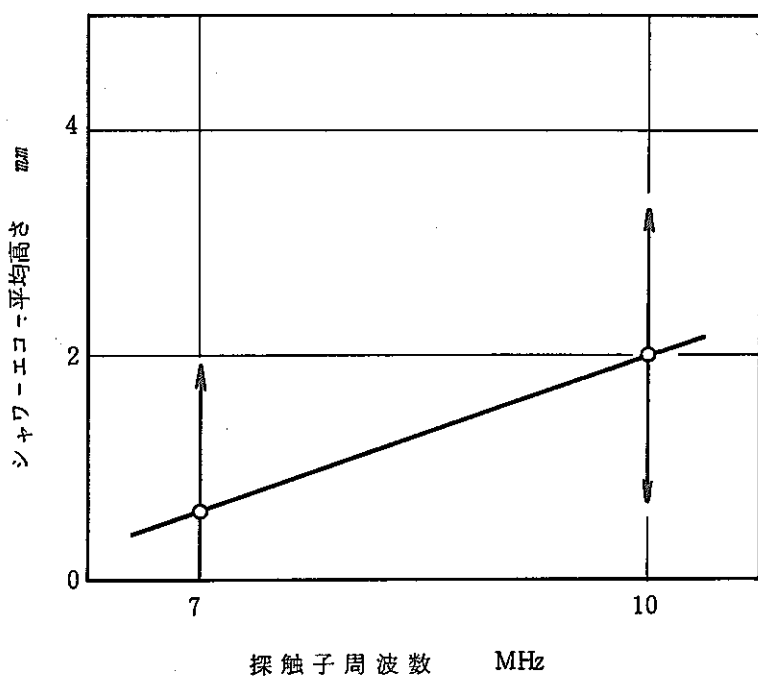


図 4.48 探触子周波数とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

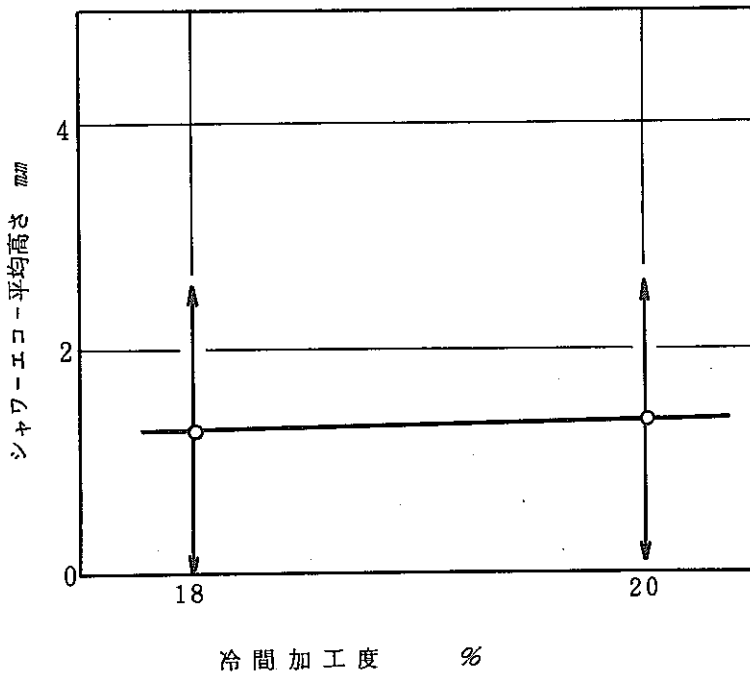


図 4.49 冷間加工度とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

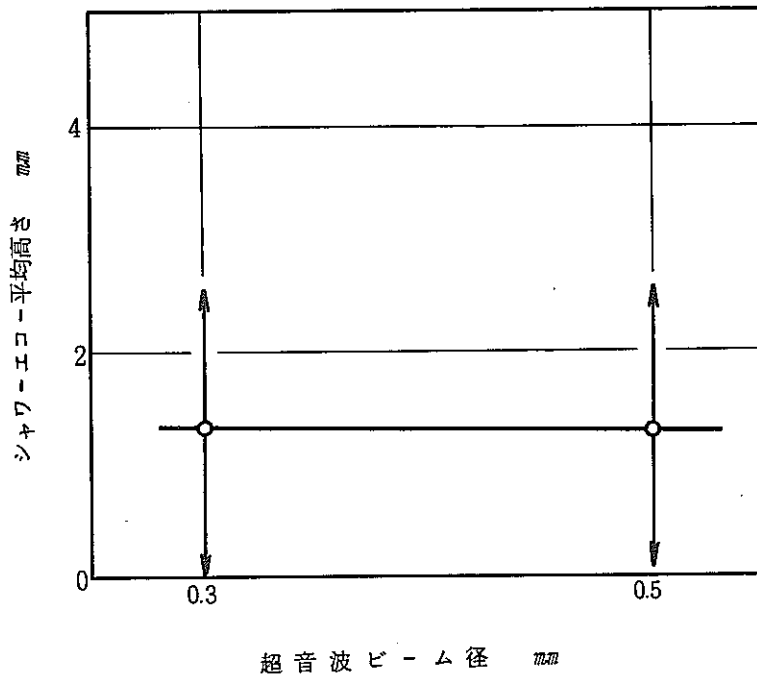


図 4.50 超音波ビーム径とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

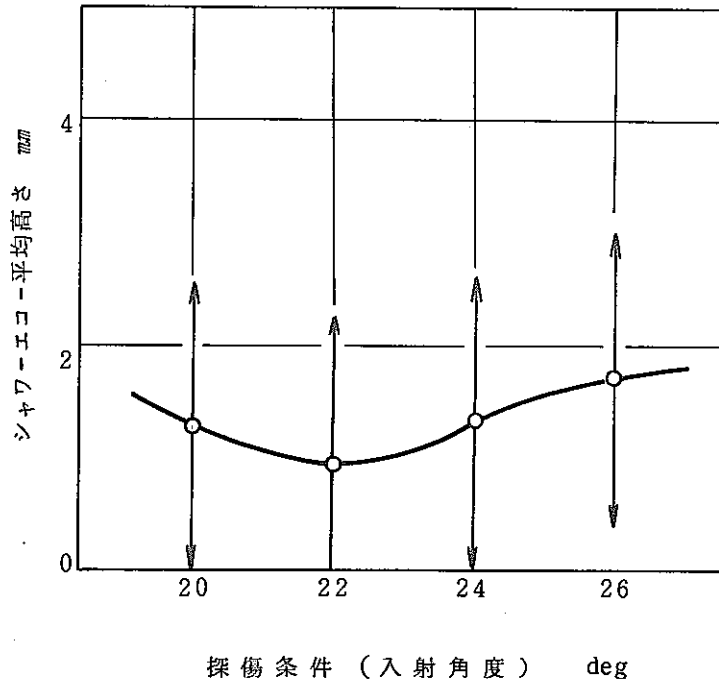


図 4.5.1 探傷条件とシャワーエコー平均高さとの関係
(周方向欠陥探傷法)

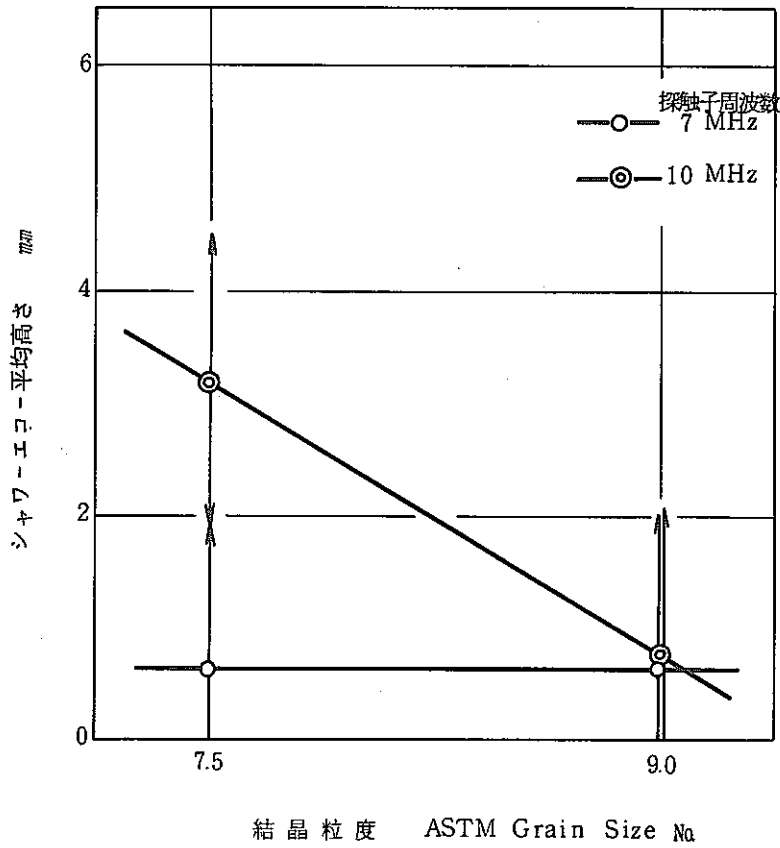


図 4.5.2 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と探触子周波数の関係
(周方向欠陥探傷法)

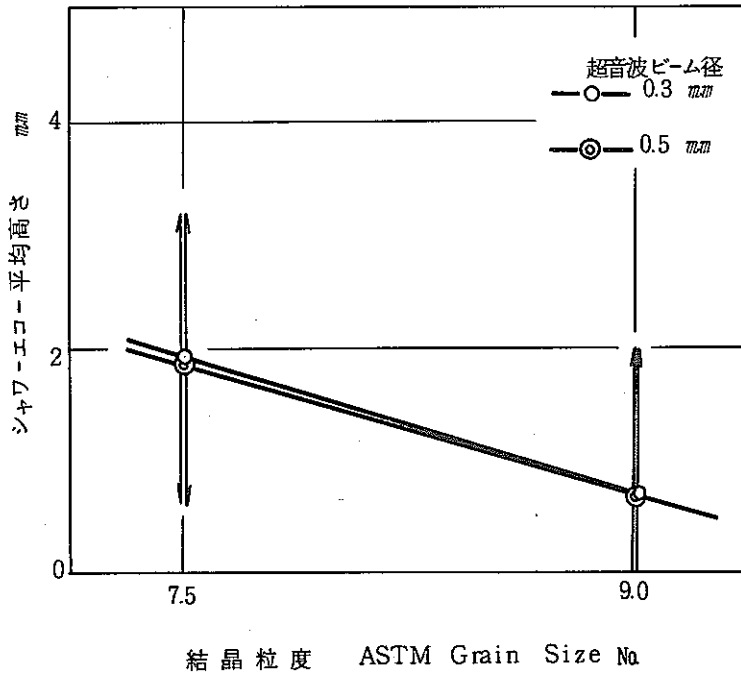


図 4.5.3 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と超音波ビーム径の関係 (周方向欠陥探傷法)

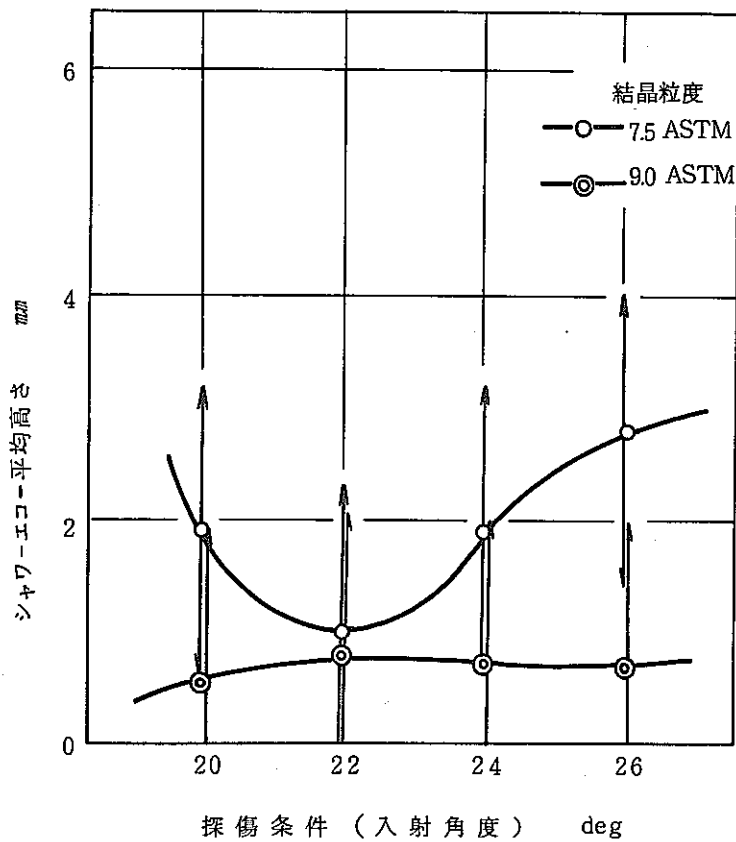


図 4.5.4 シャワーエコー平均高さに対する結晶粒度と探傷条件の関係 (周方向欠陥探傷法)

5. 考察およびまとめ

従来の探傷条件設定でのゲート位置による軸方向欠陥探傷試験では、4.1の実験結果図4.3～図4.10より最良条件を推定すると、工程平均の推定値 $\hat{\mu}$ は

$$\begin{aligned}\hat{\mu} &= \bar{A}_2 + \bar{B}_1 + \bar{C}_2 + \bar{D}_2 + \bar{E}_3 - 4\bar{T} \\ &= 0.551 + 3.663 + 3.639 + 3.060 + 2.662 - 4 \times 4.839 \\ &= -5.782\end{aligned}$$

となるから工程平均 \hat{x} は95%信頼限界で

$$\begin{aligned}\hat{x} &= \hat{\mu} \pm \sqrt{\frac{F_6^2(0.05) \times V_e}{n_e}} \\ &= -5.782 \pm \sqrt{\frac{5.99 \times 4.101}{16/12}} \\ &= -5.782 \pm 4.293\end{aligned}$$

となる。つまり、試料被覆管の結晶粒度9.0 [ASTM]、冷間加工度20 [%]、探触子周波数7 [MHz]、超音波ビーム径0.5 [mm ϕ]；軸方向探傷条件偏心量1.1 [mm] の条件で探傷試験を行なうとシャワーエコーはほとんど出ないことがわかる。

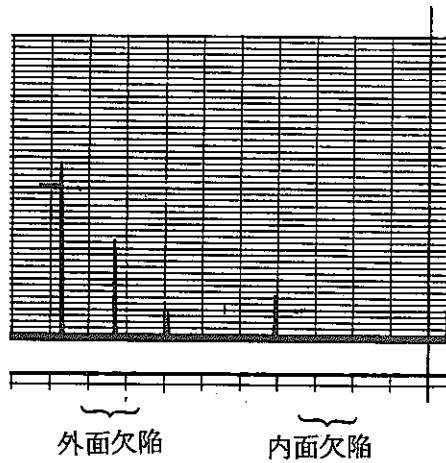
また、クリープ破壊強度を高めるため被覆管の結晶粒度を大きくする製造条件が今後とも変わらないとし結晶粒度7.5 [ASTM] のものを使ったとすると、

$$\begin{aligned}\hat{\mu} &= \bar{A}_1 + \bar{B}_1 + \bar{C}_2 + \bar{D}_2 + \bar{E}_3 - 4\bar{T} \\ &= 9.126 + 3.663 + 3.639 + 3.060 + 2.662 - 4 \times 4.839 \\ &= 2.793\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{x} &= \hat{\mu} \pm \sqrt{\frac{F_6^2(0.05) \times V_e}{n_e}} \\ &= 2.793 \pm \sqrt{\frac{5.99 \times 4.101}{16/12}} \\ &= 2.793 \pm 4.293\end{aligned}$$

となる。

このときは、試料被覆管の結晶粒度7.5 [ASTM]、冷間加工度20 [%]、探触子周波数7 [MHz]、超音波ビーム径0.5 [mm ϕ]、軸方向探傷条件偏心量1.1 [mm] で探傷試験を行なうとシャワーエコーが平均高さで最大約7.0 [mm] 発生することになる。



STB	結晶粒度	8.0 [ASTM]
	冷間加工度	20 [%]
	探触子周波数	7 [MHz]
	ビーム径	0.5 [mmφ]
	探傷条件偏心量	1.1 [mm]
	探傷感度	1.5 × 1
	チャート速度	1.0 [mm/s]

図 5.1 STB 軸方向欠陥探傷記録

この結果を STB を使って試験を行なった探傷記録図 5.1 と比較してみると内面欠陥が全く判別できず、外面欠陥も大、中欠陥程度しか判別できなくなることがわかる。

また、周方向欠陥探傷試験における最良条件は 4.1 の実験結果図 4.11 ~ 図 4.18 より、結晶粒度 9.0 [ASTM] のものを使用したとき、

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= \bar{A}_2 + \bar{B}_1 + \bar{C}_2 + \bar{D}_2 + \bar{E}_2 - 4\bar{T} \\ &= 1.336 + 1.606 + 4.463 + 3.499 + 3.006 - 4 \times 4.463 \\ &= -3.942 \\ \hat{x} &= \hat{\mu} \pm \sqrt{\frac{F_6^4 (0.05) \times V_e}{n_e}} \\ &= -3.942 \pm \sqrt{\frac{5.99 \times 3.161}{16/12}} \\ &= -3.942 \pm 3.768 \end{aligned}$$

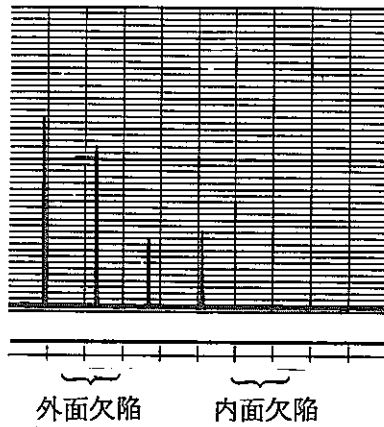
となり、試料被覆管の結晶粒度 9.0 [ASTM]、冷間加工度 20 [%]、探触子周波数 7 [MHz]、超音波ビーム径 0.5 [mmφ]、周方向探傷条件入射角 24 [deg] で探傷試験を行なうと、シャワーエコーはほとんど出ないことがわかる。

また、結晶粒度 7.5 [ASTM] のものを使用したとき、

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= \bar{A}_1 + \bar{B}_1 + \bar{C}_2 + \bar{D}_2 + \bar{E}_2 - 4\bar{T} \\ &= 7.590 + 1.606 + 4.463 + 3.499 + 3.006 - 4 \times 4.463 \\ &= 2.312 \\ \hat{x} &= \hat{\mu} \pm \sqrt{\frac{F_6^4 (0.05) \times V_e}{n_e}} \\ &= 2.312 \pm \sqrt{\frac{5.99 \times 3.161}{16/12}} \end{aligned}$$

$$= 2.312 \pm 3.768$$

となり、シャワーエコーが平均高さで最大約 6.0 [mm] 発生することがわかる。



STB	結晶粒度	8.0 [ASTM]
	冷間加工度	20 [%]
	探触子周波数	7 [MHz]
	ビーム径	0.5 [mmφ]
	探傷条件入射角度	24 [deg]
	探傷感度	2.0 × 1
	チャート速度	1.0 [mm/s]

図 5.2 STB 周方向欠陥探傷記録

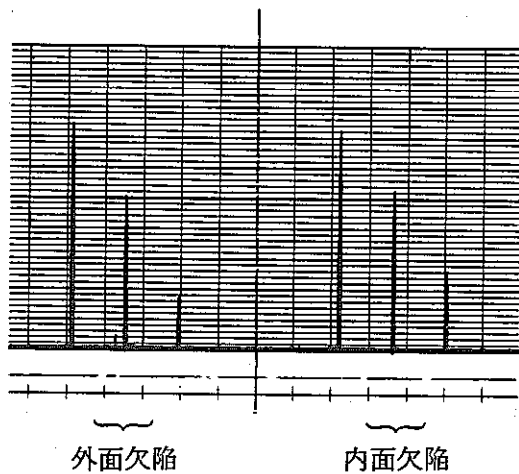
この結果を STB を使って試験を行なった探傷記録図 5.2 と比較すると、この場合も内面欠陥が全く判別できず外面欠陥も大、中欠陥程度しか判別できないことがわかる。

このように図 5.1, 図 5.2 からわかるようにシャワーエコーの平均高さが最も低く抑えられる条件と STB の欠陥探傷記録が最良となる探傷条件とは多少くい違いが見られる。

それは主として探触子周波数と超音波ビーム径の違いである。

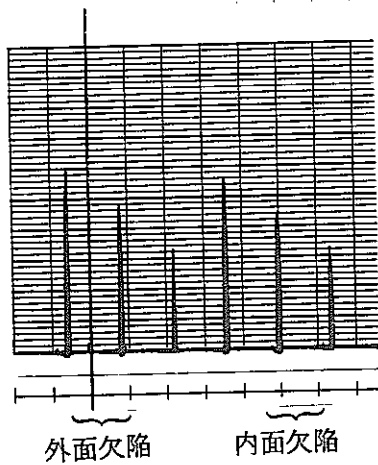
すなわちシャワーエコーの平均高さを最も低く抑えられる条件は探触子周波数 7 [MHz], ビーム径 0.5 [mmφ] のものであるが, STB の探傷記録を最良とする条件は探触子周波数 10 [MHz] ビーム径 0.3 [mmφ] のものについてであった。

図 5.3 に探触子周波数 10 [MHz], ビーム径 0.3 [mmφ] のものによる STB の探傷記録例を示す。



STB	結晶粒度	8.0 [ASTM]
	冷間加工度	20 [%]
	探触子周波数	10 [MHz]
	ビーム径	0.3 [mmφ]
	探傷条件偏心量	1.0 [mm]
	探傷感度	1.5 × 1
	チャート速度	1.0 [mm/s]

(a) 軸方向欠陥探傷記録



STB	結晶粒度	8.0 [ASTM]
	冷間加工度	20 [%]
探触子周波数		10 [MHz]
	ビーム径	0.3 [mmφ]
探傷条件入射角		26 [deg]
探傷感度		2.0 × 1
チャート速度		1.0 [mm/s]

(b) 周方向欠陥探傷記録

図 5.3 STB軸，周方向欠陥探傷記録

図 5.3(a), (b)の探傷条件で試料被覆管を探傷した場合，すなわち探触子周波数 10 [MHz]，超音波ビーム径 0.3 [mmφ]，試料被覆管の結晶粒度 9.0 [ASTM]，冷間加工度 20 [%]，軸方向探傷条件偏心量 1.0 [mm]，周方向探傷条件入射角 26 [deg] におけるシャワーエコー平均高さの 95%信頼限界での工程平均 \hat{x} を計算すると，

軸方向探傷では，

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= \bar{A}_2 + \bar{B}_2 + \bar{C}_2 + \bar{D}_1 + \bar{E}_4 - 4\bar{T} \\ &= 0.551 + 6.014 + 3.639 + 6.618 + 6.058 - 4 \times 4.839 \\ &= 3.524 \\ \hat{x} &= \hat{\mu} \pm \sqrt{\frac{F_6^1(0.05) \times Ve}{n_e}} \\ &= 3.524 \pm \sqrt{\frac{5.99 \times 4.101}{16/12}} \\ &= 3.524 \pm 4.293 \end{aligned}$$

となり，シャワーエコーの平均高さがチャート上で最大約 7.8 [mm] まで発生する可能性があることを示している。

この計算結果を図 5.3 の軸方向探傷記録と比較すると大中欠陥程度の判別しかできなくなることがわかる。

また，周方向探傷では

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= \bar{A}_2 + \bar{B}_2 + \bar{C}_2 + \bar{D}_1 + \bar{E}_4 - 4\bar{T} \\ &= 1.336 + 7.320 + 4.463 + 5.427 + 5.823 - 4 \times 4.463 \\ &= 6.517 \\ \hat{x} &= \hat{\mu} \pm \sqrt{\frac{F_6^1(0.05) \times Ve}{n_e}} \end{aligned}$$

$$= 6.517 \pm \sqrt{\frac{5.99 \times 3.161}{16/12}}$$

$$= 6.517 \pm 3.768$$

となり、シャワーエコーの平均高さがチャート上で最小約2.7 [mm] から最大約10.3 [mm] まで発生することを示している。

この計算結果を図5.3の周方向探傷記録と比較するとこの場合も大、中欠陥程度の判別しかできなくなることがわかる。

つぎに、試料被覆管の結晶粒度を7.5 [ASTM] としたとき軸方向探傷試験のシャワーエコー平均高さの工程平均 \hat{x} は95%信頼限界で

$$\begin{aligned}\hat{\mu} &= \bar{A}_1 + \bar{B}_2 + \bar{C}_2 + \bar{D}_1 + \bar{E}_4 - 4\bar{T} \\ &= 9.126 + 6.014 + 3.639 + 6.618 + 6.058 - 4 \times 4.839 \\ &= 12.099 \\ \hat{x} &= \hat{\mu} \pm \sqrt{\frac{F_6^2(0.05) \times V_e}{n_e}} \\ &= 12.099 \pm \sqrt{\frac{5.99 \times 4.101}{16/12}} \\ &= 12.099 \pm 4.293\end{aligned}$$

となり、シャワーエコーの平均高さがチャート上で最小約7.8 [mm] から最大約16.4 [mm] まで発生することになり中欠陥以上のチャート上での判別も非常に難しくなることがわかる。

また、試料被覆管の結晶粒度を7.5 [ASTM] としたとき、周方向探傷試験のシャワーエコーの平均高さの工程平均 \hat{x} は95%信頼限界で

$$\begin{aligned}\hat{\mu} &= \bar{A}_1 + \bar{B}_2 + \bar{C}_2 + \bar{D}_1 + \bar{E}_4 - 4\bar{T} \\ &= 7.590 + 7.320 + 4.463 + 5.427 + 5.823 - 4 \times 4.463 \\ &= 12.771 \\ \hat{x} &= \hat{\mu} \pm \sqrt{\frac{F_6^2(0.05) \times V_e}{n_e}} \\ &= 12.771 \pm \sqrt{\frac{5.99 \times 3.161}{16/12}} \\ &= 12.771 \pm 3.768\end{aligned}$$

となり、シャワーエコーの平均高さがチャート上で最小約9.0 [mm] から最大約16.6 [mm] まで発生することになり、中欠陥のチャート上での判別がほとんど困難となることがわかる。

以上の工程平均の計算は実際の探傷条件設定方法におけるものであるが、従来の探傷方法の他に、特性値への誤差要因を考慮して今回行った探触子の焦点距離を一定とし、CRT上で表面反射エコーからゲートまでの距離を一定とする方法（探傷感度一定および変化の2方法）におい

でも工程平均の計算結果は同様な傾向を示した。

すなわち STB による探傷記録の最良探傷条件とシャワーエコーの平均高さの最小抑止条件とは主として探触子周波数と超音波ビーム径によって異なることが判明した。

今後、被覆管のクリープ破壊強度を結晶粒度を大きくすることによって維持していくことが予想されることを考えると、以上の結果、考察から探触子周波数 10 [MHz]、ビーム径 0.3 [mm ϕ] のものでは STB の探傷記録は割合良好なものが得られやすいが、シャワーエコーの発生が中欠陥の判別も非常に困難にすることが予想される。

このため、STB の探傷記録は比較的得られにくいシャワーエコーを最小に抑止する可能性のある探触子周波数 7 [MHz]、ビーム径 0.5 [mm ϕ] による探傷試験によって STB の探傷記録を最良にする探傷条件を見い出していくことが今後特に必要なことのように思われる。

6. あ と が き

今回の試験では、分散分析の特性値はシャワーエコーの一応の代表値として画像解析装置による面積平均値を用いた。

実際のシャワーエコーと欠陥との相互比較という点からするとシャワーエコーの最大高さを特性値とする方がより妥当であると当初考えたが、シャワーエコー中にノイズと思われるエコーが少なからず発生し、全体として各要因とシャワーエコーとの相関パターンを評価しにくいことが考えられたので止むを得ず特性値として平均高さを代表させたのである。

ところが実際にはノイズとシャワーエコーの識別はあまり明確でなく、今回は最大高さを考慮に入れない形になったので、この識別をはっきりさせるためにも解析には平均高さならびに最大、最小高さ、或いは平均高さからある一定の偏差値を伴った高さの三つの値を特性値として用いた方が良かったように思われる。

また、今回の試験では手持ちの装置、探触子等の関係上、各因子水準を2水準としたが、各因子の主効果のグラフを表示するためには少くとも3水準は必要である。

特に結晶粒度の場合にはSTB（結晶粒度8.0〔ASTM Grain Size Number〕）である程度シャワーエコーが出ないことが判明しているので、今後は因子水準の決定の際に、7.5〔ASTM Grain Size Number〕から8.0〔ASTM Grain Size Number〕の間に結晶粒度水準をとって実験を進めていくなどの考慮が必要のように思われる。