

「傷の反射率」を簡単な式で表わす

Represent by simple equations of "sound reflecting power of flaw" in ultrasonic testing

木村勝美

Katsuyoshi KIMURA

概 要

日本非破壊検査協会発行の「超音波探傷試験Ⅲ」では、超音波探傷理論における「傷の反射率」は三角関数、フレネル積分や Stenzel の反射係数などで表現されている。これらには難解なものがある。これらを簡単な式で表わして使いやすいようにした。また、傷が極めて小さい場合の「傷の反射率」について、現在は球形傷についてしか示されていないが、これを多くの傷について検討した。そして、傷の反射率を簡単な式で表わすようにした。

キーワード：超音波探傷、パルス法、垂直法

1. まえがき

1997年2月の超音波探傷3種の講習会で、超音波探傷試験Ⅲのp.20(2000年版ではp.70)の傷の反射率の表で、適用条件で $2r > 0.7\lambda$ などの記載があるが、欠陥がもっと小さいときどうなるのかという質問があり、即答できないので、自宅に帰ってから、計算結果をNDIにFAXし、OHPにして見せてくれるように頼んだ。その年の3月にある大手の会社の方から、教科書では $\lambda/2$ 以下の欠陥は検出できないように書いてあるが本当なのか。違うならどのくらい小さい欠陥まで検出できるのかの質問があり、NDI資料2666[1]をFAXした。

このような質問が出るのは、小さな欠陥の検出が問題になっているのだと判断した。小さい欠陥の傷の反射率については、Ermolovの論文[2]に刺激されて検討を始め、1978年に第2分科会で発表[1]した。今回、極めて小さい欠陥の場合を含めて傷の反射率を再検討した。その結果をここで報告する。

2. 傷の反射率の定義

欠陥による超音波の反射の程度を定量的に扱うために、図1に示すように、欠陥の位置に無限に大きくて超音波ビームに垂直な平面の完全反射面があると仮定して、欠陥によるエコーの音圧 P_F の無限大平面からの反射波の音圧 P_∞ に対する比(ただし、絶対値)を傷の反射率 γ として定義している[3]。

$$\gamma = P_F / P_\infty \dots\dots\dots (1)$$

$\gamma=1$ と言えば、無限に大きい完全反射面と同等のエコーを生じることを意味する。ただし、十分な遠距離音場での話である。

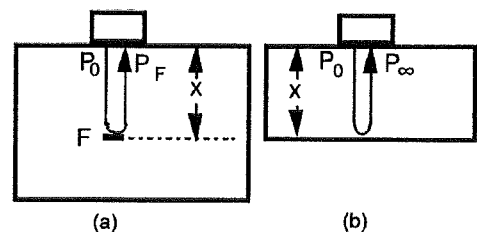


図1 傷の反射率の定義
(a) 欠陥からの反射
(b) 仮想完全反射面からの反射

3. 傷の反射率

東北大学電気通信研究所の実吉純一先生は、海中の潜水艦などの探知(Sonar technique)に関連すると思われるが、「音波及び超音波の反射について」と題した理論[4]を1943年に発表された。それでは、「反

射面の反射率」を定義された。東北大学の菊池喜充先生は、その理論が超音波探傷理論として使えると判断されて、1956年に丸善の「超音波探傷法」で「傷の反射率」として使用された。その後、1964年に日刊工業から同名の本が発行された。その時に、菊池先生から、「古今東西の文献に照らして誤りなきを期せ」という条件を付けて、木村が「傷の反射率」の執筆を命じられ、幾らか改良したものを書いた。1974年発行の「超音波探傷法（改訂新版）」でも木村が執筆した。

「傷の反射率」は、日本非破壊検査協会の「超音波探傷試験 B 1979」では明治大学の井元艦二先生が執筆し、「超音波探傷試験Ⅲ 1989年版」では、木村が執筆した。そして、現在の「超音波探傷試験Ⅲ 2001年版」[5]では、高知大学の裏垣博先生が執筆している。

傷の反射率は次式で表わされる[5]。

直径 d_0 の円形平面欠陥に対して
$$\gamma_1 = 2 \sin \left(\frac{\pi d_0^2}{4\lambda x} \right) \dots\dots\dots (2)$$

直径 d_s の球形欠陥に対して
$$\gamma_2 = \frac{d_s}{x} |z| \dots\dots\dots (3)$$

ここで z は Stenzel の反射係数である [6] 。

幅 W の長い帯状平面欠陥に対して
$$\gamma_3 = 2\sqrt{0.5\sqrt{S^2(a') + C^2(a')}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで $S(z), C(z)$ はフレネル積分であり、 $a' = W/\sqrt{\lambda x}$ である

直径 d_c の長い円柱形欠陥に対して
$$\gamma_4 = \sqrt{\frac{d_c}{d_c + 2x}} \dots\dots\dots (5)$$

円形平面欠陥[式(2)]と長い帯状平面欠陥[式(4)]は、図 2.52 と図 2.53 に示すように、直径または帯の幅がかなり大きくなると、 γ の値が 1 の付近で大きく振動する。しかし、パルスの場合には幾らか振動しながら $\gamma=1$ に収斂する。一方、球形欠陥[式(3)]の場合には、直径が大きくなると、式(3)では幾らでも γ が大きくなるが、実際には、1 に収斂するものと思われる。

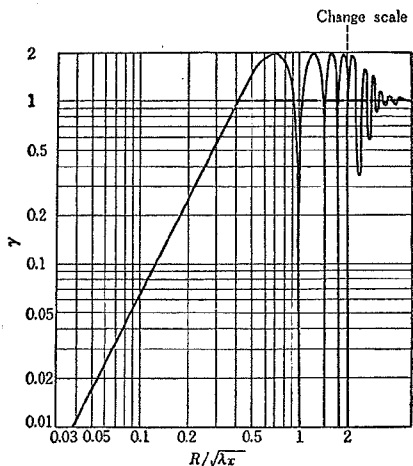


図 2.52 円形平面傷の反射率

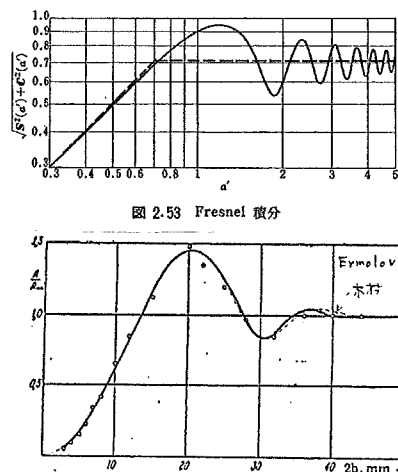


Fig. 3. Amplitude of the signal reflected from the disc as a function of the disc diameter ($R = 100$ mm, $a = 8$ mm, $\lambda = 2.34$ mm).

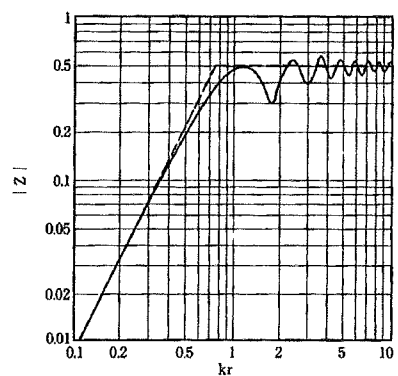


図 5 ステンツェルの反射係数(木村)

これらの式のうち、波長より小さい欠陥にも適用できるのは、球形欠陥に対する式(3)だけである。Fig. 3 は Ermolov の論文[7]に出ている円形平面欠陥に対する P_F/P_∞ (すなわち傷の反射率) で、2.5M12N

の探触子で鋼の試験片についての計算値と実験結果であると判断される (5.85 (km/s) / 2.34mm = 2.5MHz)。実線は彼の計算値である。木村と書いてある破線は木村の式[8]による計算値で、彼の計算値と殆ど一致している。プロットは距離 100mm の位置にある直径が 5~50mm の平底穴についての W. Morgan[9]の実験値であるとされているが、文献[9]の著者は J. B. Morgan で、別人で内容も全く異なっている。従って、Ermolov は姓が同じ別人の論文を間違えて W. Morgan の論文としてしまったと思われる。J. B. Morgan は 2.25MHz でアルミニウム合金を使用して実験している。Ermolov の論文の Fig. 3 のデータでは 2.5MHz で実験していると判断される。ロシアでは 2.5MHz が良く使用されているから、ロシアの W. Morgan の研究をアメリカの J. B. Morgan の研究と間違えたものと判断される。しかし、兎に角かなりの遠距離音場 (n=6.5) にある円形平面欠陥であるが、欠陥の直径が 13mm 以上になると、傷の反射率は 1 を超えるが、2 まで達せず最大 1.45 くらいになった後、2 回上下して 1 に収斂している。

4. Ermolov の理論式

1970 年に Hannover で開催された第 6 回国際非破壊試験会議の時に、I. N. Ermolov は、既にソ連（現在のロシア）における非破壊検査研究の大家になっており、国際会議場ではソ連の研究者の集団の先頭に立って歩いていた。「彼が Ermolov です」と三菱重工の人に教えられた。木村は、かなり以前から Ermolov の研究に注目し、国会図書館などで彼の研究論文を調査していた。部下の一人が以前国会図書館職員だったので、一般には利用できない整理されていない文献も調べることが出来た。最初のうちはロシア語の論文を読むのに随分苦労したが、英訳版がアメリカで発行されるようになった後からは楽になった。

Ermolov は 1959 年[7]から、単純な形状の標的による超音波の反射について発表し、1972 年に纏めた結果[2] を発表（非破壊検査、23 巻 10 号で木村が紹介）している。彼は波長より小さい欠陥も扱っている。

INSIGHT Vol. 40, No. 6 (1998) で Ermolov の宛名を発見したので、木村は彼に 1999 年末に手紙を出し、「小さい円形平面欠陥の形状係数 $K_f = 0.3(d_f/\lambda)^3$ の係数 0.3 が小さ過ぎるように思われる。」と指摘した。それに対して、2001 年 3 月に A5 版で 104 ページのハンドブック[10]を送ってきて、「 $A = 1.5(d/\lambda)^3$ に対する御礼」と書いてあり、係数 0.3 を 1.5 に改訂している。しかし、改訂の根拠は示されていない。

ここでは Ermolov の研究成果を利用しながら、「傷の反射率」を整理して簡単な式で表わすようにする。しかし、彼は式の根拠を明確には示していないので、可能な限りチェックした。

5. 寸法が波長より大きい、著しく大きくはない欠陥の場合の欠陥エコー高さの式

垂直探傷における欠陥エコー高さは、欠陥の形状寸法、波長、ビーム路程で変化する関数である。しかし、超音波探傷で通常問題となる程度の大きさの欠陥、すなわち、寸法が波長より大きい、著しく大きくはない欠陥の場合には、欠陥エコーとして探触子に受信される音圧 P_f の送信音圧 P_0 に対する比 P_f/P_0 は比較的簡単な式で表わされる。すなわち、減衰を無視すると、超音波探傷試験Ⅲ2001 [5]、日本学術振興会の本[3]あるいは Ermolov の論文[2]に示されているように、次式で与えられる。

$$\text{直径 } d_0 \text{ の円形平面欠陥に対して} \quad \frac{P_f}{P_0} = \frac{A}{2\lambda x} \frac{\pi d_0^2}{2\lambda x} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{直径 } d_s \text{ の球形欠陥に対して} \quad \frac{P_f}{P_0} = \frac{A}{2\lambda x} \frac{d_s}{2x} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{幅 } W \text{ の帯状平面欠陥に対して} \quad \frac{P_f}{P_0} = \frac{A}{2\lambda x} \sqrt{\frac{2}{\lambda x}} W \quad \dots\dots\dots (8)$$

直径 d_c の円柱形欠陥に対して $\frac{P_F}{P_0} = \frac{A}{2\lambda x} \sqrt{\frac{d_c}{2x}}$ (9)

ここで、 A : 振動子の面積、 x : 探触子から欠陥までの距離、 λ : 波長 である。

以上の式では、テキストと異なり半径の代わりに直径を使うようにした。そして、 $A/2\lambda x$ (底面エコーの音圧) で括弧のようにしたので、その右の部分は、その欠陥の「傷の反射率」である。また、帯状平面欠陥は細長い方形欠陥であり、鋼板の介在物や溶接部の溶け込み不良などの評価に役立つと考えて掲載した。

遠距離音場 (規準化距離 n が3以上) においては、これらの式は欠陥寸法がかなり大きくても、十分な精度で成立する。しかし、欠陥の寸法が波長と同程度およびそれ以下になると、Stenzel [6], 加藤 [11] 及び Golubev [12] によって示されているように、特殊な関数または式で表わされるようになる。

6. 形状係数と距離係数

Ermolov [2] は P_F/P_0 の式を単純化するために、形状係数 K を距離係数 I とともに導入した。これは、理論と実際とを結び付けるための一つの大きな進歩である。Ermolov の式を上述の式の記号を用いて表わせば、次のようになる。なお、 D は振動子の直径である。

円形平面欠陥、球形欠陥および短円柱形欠陥 (第1類、点欠陥) に対して

$$\frac{P_F}{P_0} = K \frac{\lambda^2}{A} I_1 e^{-2\alpha x} \quad \text{..... (10)}$$

長円柱および帯状平面欠陥 (第2類、長い欠陥) に対して

$$\frac{P_F}{P_0} = K \frac{2\lambda}{D} I_2 e^{-2\alpha x} \quad \text{..... (11)}$$

I_1 および I_2 は、規準化距離 n の関数として図2によって与えられる。

ここで $n = \frac{x}{x_0} = \frac{x}{\frac{D^2}{4\lambda}} = \frac{x\lambda}{\frac{D^2}{4}} = \frac{x\pi\lambda}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{x\pi\lambda}{A}$ である。

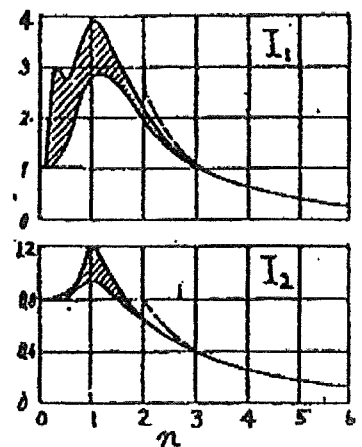


図2. I_1, I_2 の値

遠距離音場 (ただし、 $n \geq 3$) では、 I_1 および I_2 は次式で与えられる。

$$I_1 = \frac{\pi^2}{n^2} \quad \text{..... (12)}$$

$$I_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}n^{1.5}} \quad \text{..... (13)}$$

K は、欠陥寸法および波長の関数として表1で与えられる。この表で、*印のところは、Ermolov の2000年発行のハンドブック [10] によった。**印、***印および****印のところは木村の判断で記入した。この表から明らかなように、 K は欠陥の形で変わるほか、 $d > 2\lambda$ と $d < 0.2\lambda$ とで著しく異なっている。超音波探傷で出会う可能性のある $d = (0.2 \sim 2)\lambda$ の範囲では、難しいことになるようである。ただし、球に対しては Stenzel [6] が解いた。また、円柱については加藤 [11] と Golubev [12] が解いた。

7. 形状係数 K と傷の反射率 γ との関係 ($d > 2\lambda$ の場合)

7.1 第1類の欠陥 (点欠陥) の場合

式(10)の I_1 に式(12)を代入すると

$$\frac{P_{F1}}{P_0} = K \frac{\lambda^2}{A} I_1 = K \frac{\lambda^2}{A} \frac{\pi^2 A^2}{x^2 \pi^2 \lambda^2} = K \frac{A}{x^2} \quad \dots\dots (14)$$

直径 d_D の円形平面欠陥で、 $d_D > 2\lambda$ のときには $K_1 = \frac{\pi d_D^2}{4\lambda^2}$ であるから

$$\frac{P_{FD}}{P_0} = K_1 \frac{A}{x^2} = \frac{\pi d_D^2}{4\lambda^2} \frac{A}{x^2} = \frac{A \pi d_D^2}{4\lambda^2 x^2} = \frac{A \pi d_D^2}{2\lambda x \cdot 2\lambda x} = \frac{A}{2\lambda x} \gamma_1 \quad (15)$$

したがって $\frac{P_{FD}}{P_0} = K_1 \frac{A}{x^2} = \frac{A}{2\lambda x} \gamma_1 \quad \dots\dots (16)$

故に $K_1 = \frac{x}{2\lambda} \gamma_1 \quad \gamma_1 = \frac{2\lambda}{x} K_1 \quad \dots\dots (17)$

直径 d_S の球形欠陥で、 $d_S > 2\lambda$ のときには $K_2 = \frac{d_S}{4\lambda}$ であるから

$$\frac{P_{FS}}{P_0} = K_2 \frac{A}{x^2} = \frac{d_S}{4\lambda} \frac{A}{x^2} = \frac{A d_S}{2\lambda x \cdot 2x} = \frac{A}{2\lambda x} \gamma_2 \quad \dots (18)$$

したがって $\frac{P_{FS}}{P_0} = K_2 \frac{A}{x^2} = \frac{A}{2\lambda x} \gamma_2 \quad \dots\dots (19)$

故に $K_2 = \frac{x}{2\lambda} \gamma_2 \quad \gamma_2 = \frac{2\lambda}{x} K_2 \quad \dots (20)$

7.2 第2類の欠陥(長い欠陥)の場合

次に、式(11)の I_2 に式(13)を代入すると

$$\begin{aligned} \frac{P_{F2}}{P_0} &= K \frac{2\lambda}{D} I_2 = K \frac{2\lambda}{D} \frac{\pi A^{1.5}}{\sqrt{2x^{1.5} \pi^{1.5} \lambda^{1.5}}} = K \frac{2\lambda}{D} \frac{\pi \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)^{1.5}}{\sqrt{2x^{1.5} \pi^{1.5} \lambda^{1.5}}} \\ &= K \frac{2\lambda}{D} \frac{\pi \pi^{1.5} D^3}{\sqrt{2x^{1.5} \pi^{1.5} \lambda^{1.5} 4^{1.5}}} = K \frac{2}{1} \frac{\pi \pi^{1.5} D^2}{\sqrt{2x^{1.5} \pi^{1.5} \lambda^{0.5} 4 \cdot 2}} \\ &= K \frac{\pi D^2}{\sqrt{2x^{1.5} \lambda^{0.5} 4}} = K \frac{A}{x^{1.5} \sqrt{2\lambda}} \quad \dots\dots (21) \end{aligned}$$

直径 d_C の円柱形欠陥で、 $d > 2\lambda$ のときには

$K_C = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d_C}{\lambda}}$ であるから

$$\frac{P_{FC}}{P_0} = K_C \frac{A}{x^{1.5} \sqrt{2\lambda}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d_C}{\lambda}} \frac{A}{x^{1.5} \sqrt{2\lambda}} = \frac{1}{2} \frac{A \sqrt{x}}{x^{1.5} \lambda} \sqrt{\frac{d_C}{\lambda}} = \frac{1}{2} \frac{A}{x \lambda} \sqrt{\frac{d_C}{\lambda}} = \frac{A}{2\lambda x} \sqrt{\frac{d_C}{\lambda}} = \frac{A}{2\lambda x} \gamma_4 \quad \dots\dots (22)$$

故に $K_C = \sqrt{\frac{x}{2\lambda}} \gamma_4 \quad \gamma_4 = \sqrt{\frac{2\lambda}{x}} K_C \quad \dots\dots (23)$

幅 W の帯状平面欠陥で、 $W > 2\lambda$ のときには $K_R = \frac{W}{\lambda}$ であるから

$$\frac{P_{FR}}{P_0} = K_R \frac{A}{x^{1.5} \sqrt{2\lambda}} = \sqrt{\frac{2}{\lambda x}} \frac{W}{\lambda} \frac{A}{x^{1.5} \sqrt{2\lambda}} \sqrt{\frac{\lambda x}{2}} = \sqrt{\frac{2}{\lambda x}} \frac{W}{\lambda x^{1.5} \sqrt{2\lambda}} \sqrt{\frac{\lambda x}{2}} = \sqrt{\frac{2}{\lambda x}} \frac{W}{2\lambda x} = \frac{A}{2\lambda x} \sqrt{\frac{2}{\lambda x}} W = \frac{A}{2\lambda x} \gamma_3 \quad \dots (24)$$

故に $K_R = \sqrt{\frac{x}{2\lambda}} \gamma_3 \quad \gamma_3 = \sqrt{\frac{2\lambda}{x}} K_R \quad \dots\dots (25)$

これらの $d > 2\lambda$ の場合における K と γ の関係は、表1で $d < 0.2\lambda$ の K の値として複数の式がある場合に、**印、***印及び****印を付けた式を用いれば、 $d < 0.2\lambda$ の場合にも殆ど同じ関係(誤差0.40%以下)が成立する。これによって表1を改訂したものを表1Bに示す。

表1 欠陥の形状と形状係数Kとの関係

欠陥の形状	形状係数 K	
	$d, W > 2\lambda$	$d, W < 0.2\lambda$
直径 d_D の平面	$K_D = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_D}{\lambda}\right)^2$	$K_D = 0.3 \left(\frac{d_D}{\lambda}\right)^3$ (A)
		$K_D = 1.5 \left(\frac{d_D}{\lambda}\right)^3$ *
		$K_D = 1.65 \left(\frac{d_D}{\lambda}\right)^3$ **
直径 d_S の球	$K_S = \frac{d_S}{4\lambda}$	$K_S = 4.3 \left(\frac{d_S}{\lambda}\right)^3$
		$K_S = 4.1 \left(\frac{d_S}{\lambda}\right)^3$ ****
直径 d_C 、長さ l_C の短円柱	$K_C = \frac{l_C}{2} \sqrt{\frac{d_C}{\lambda}}$	—
幅 W の長い帯	$K_R = \frac{W}{\lambda}$	$K_R = 4.9 \left(\frac{W}{\lambda}\right)^2$
		$K_R = 5 \left(\frac{W}{\lambda}\right)^2$ ***
直径 d_C の長い円柱	$K_C = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d_C}{\lambda}}$	$K_C = 7.4 \left(\frac{d_C}{\lambda}\right)^2$

* Ermolovの新しい式[4]

** 放射インピーダンスの考え[9]から求めた。

*** 大橋らの実験結果[12]から求めた。

**** 加藤の論文[8]から求めた。

表 1 B 欠陥の形状と形状係数 K との関係

欠陥の形状	形状係数 K	
	$d, W > 2\lambda$	$d, W < 0.2\lambda$
直径 d_D の平面	$K_D = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_D}{\lambda} \right)^2$	$K_D = 1.65 \left(\frac{d_D}{\lambda} \right)^3$ **
直径 d_S の球	$K_S = \frac{d_S}{4\lambda}$	$K_S = 4.1 \left(\frac{d_S}{\lambda} \right)^3$ ****
幅 W の長い帯	$K_R = \frac{W}{\lambda}$	$K_R = 5 \left(\frac{W}{\lambda} \right)^2$ ***
直径 d_C の長い円柱	$K_C = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d_C}{\lambda}}$	$K_C = 7.4 \left(\frac{d_C}{\lambda} \right)^2$

** : 放射インピーダンスの考え [9] から求めた。

*** : 大橋らの実験結果 [12] から求めた。

**** : 加藤の論文 [8] から求めた。

8. 波長比係数 E_F

波長比係数 E_F は、木村が 1978 年に第 2 分科会 (現在の超音波分科会) で発表した論文 [1] で、超音波探傷理論を整理するために使用したもので、 $d_f < \lambda$ のときの傷の反射率 γ を $d_f > 2\lambda$ のときの γ で除した値である。この様にすることによって、 $d_f < \lambda$ のときの γ を扱いやすくなる。

$$E_F = \frac{\gamma}{d_f > 2\lambda \text{ における } \gamma} \dots\dots\dots (26)$$

ただし、この波長比係数は便宜的なものなので、今回の報告では使うが、それは以前に描いた図を少し手直しして利用するためである。本来は、傷の反射率だけで記述すべきものであろう。

9. 傷の反射率の式

9.1 円形平面欠陥 (直径 d_D) の場合の傷の反射率

欠陥が極めて小さく $d_D/\lambda < 0.2$ の場合には、式 (14) に表 1 の中の式 $K_D = 1.5 (d_D/\lambda)^3$ を代入すれば、

$$\frac{P_{FD}}{P_0} = K \frac{A}{x^2} = 1.5 \left(\frac{d_D}{\lambda} \right)^3 \frac{A}{x^2} = \frac{A}{2\lambda x} \frac{1.5 \cdot 2d_D^3}{\lambda^2 x} = \frac{A}{2\lambda x} \frac{3d_D^3}{\lambda^2 x} \dots\dots\dots (27)$$

$$\therefore \gamma_1 = \frac{3d_D^3}{\lambda^2 x} \dots\dots\dots (28)$$

9.1.1 $K_D = 1.5 (d_D/\lambda)^3$ について検討

ここで、 $K_D = 1.5 (d_D/\lambda)^3$ について検討する。Ermolov はハンドブック [10] でこの式を示しているが、根拠については示していない。それで、ここで検討してみる。

円形平面欠陥によってエコーが生じるのは、円形平面欠陥が超音波を受けて振動する音源となるためである。そこで、図 3 に示すピストン音源の放射インピーダンス [13] について検討した。

超音波技術便覧 [13] に載っている図 3 から $r_r/\rho c$ 及び $x_r/\rho c$ の値を読み取り、次式で放射インピーダンスの実効値 E_D を計算した。

$$E_D = \sqrt{(x_r/\rho c)^2 + (r_r/\rho c)^2} \dots\dots\dots (29)$$

計算結果を図 4 の中に破線で示した。

Ermolov [3] の K_D [式 (A)] から E_D を求めると、

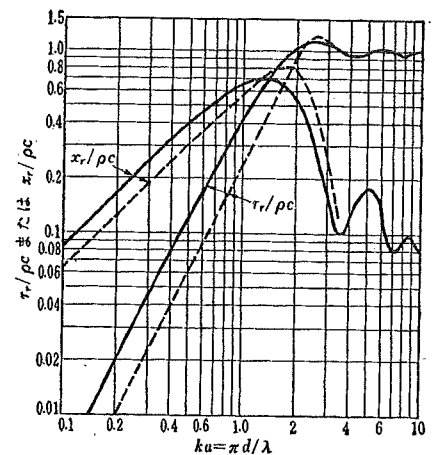
$$d_D/\lambda > 2 \text{ のとき } E_D = 1 \dots\dots\dots (30)$$

$d_D/\lambda < 0.2$ のとき、

$$E_D = 0.3 \left(\frac{d_D}{\lambda} \right)^3 \bigg/ \left(\frac{\pi d_D^2}{4\lambda^2} \right) = 0.382 \frac{d_D}{\lambda} \dots\dots\dots (31)$$

両式を図 4 の中に示した。

式 (29) は式 (30) との整合性は良好である。STB-G 試作時の経験 [14] による E_F の値を図 4 の中に $\dots \times \dots$



実線 : 無限大パッフルあり
破線 : パッフルなし
図 3. 円形ピストンの放射インピーダンス

で示したが、これは式(29)との整合性は良好である。一方、式(31)は式(30)との整合性は余り良くない。

円形平面欠陥はバツフル無しの欠陥と考えるべきであるから、式(29)が適していると考えられる。

平底ドリル穴はバツフル付きの円形平面欠陥に近いと考えられるが、穴の側面も幾らかエコー高さに寄与するようであり、2.25MHzで1mmφ(図4で $d_0/\lambda=1/2.62=0.38$)の場合には、 d_0/λ が小さいので、その影響が明瞭に現れて、 E_f の値が10%くらい大きくなっているものと判断される。

$$3.3 \frac{d_D^3}{\lambda^2 x} \div \frac{\pi d_D^2}{2\lambda x} = 2.1 \frac{d_D}{\lambda} \quad \text{であるから、バツフル無し} \quad \text{の式}$$

(29)は、式(31)の係数0.382を2.1としたものと第一近似的に等しい。このことは、表1における直径 d_0 の平面におけるErmolov[3]の式(A)の係数0.3を5.5倍することに等しい。これは、表1において、直径 d_0 の円板の形状係数 K_0 を5.5倍して

$$K_0 = 1.65 (d_0/\lambda)^3 \quad \dots\dots\dots (32A)$$

とすることになる。

このように考えると、Ermolov[2]は $K_0=0.3(d_0/\lambda)^3$ (A)の導き出しに当たって、係数は1.6くらいになるところを、何らかの手違いによって0.3としてしまったと考えるのが良さそうである。ただし、Ermolovに手紙を出した時に、このことは書かなかった。

図4の中の一点鎖線は式(31)を5倍したものであり、Ermolovの新しい式 $K_0=1.5(d_0/\lambda)^3$ と同等である[$1.5(d/\lambda)^3 / [(\pi/4)(d/\lambda)^2] = 1.91d/\lambda$ であり、 $0.382 \times 5 = 1.91$ である]。これは式(29)の直線部分である式 $E_0=2.1d_0/\lambda$ (32)と極めて近く、その91%の値である。

9.1.2 $d_0/\lambda < 0.48$ で $\gamma_1 = 3.3 \frac{d_D^3}{\lambda^2 x}$ の検討

木村はこの式を1994年8月に使っているが、式の根拠が分からなくなったので改めて検討した。

$d_0/\lambda > 0.7$ の場合には、 $\gamma = \pi d_0^2 / (2\lambda x)$ であることは既に分かっている。

図4の式(29)の直線部分の式(32)は $E_0=2.1d_0/\lambda$ であるから、

$d_0/\lambda < 0.7$ の場合には、

$$\gamma_1 = \frac{\pi d_D^2}{2\lambda x} \cdot \frac{2.1d_D}{\lambda} = \frac{1.05\pi d_D^3}{\lambda^2 x} \approx \frac{3.3d_D^3}{\lambda^2 x} \quad \dots\dots\dots (33)$$

となる。

数値計算によって適用範囲を調べると、 $d_0/\lambda=0.48$ が境になる。

$d_D/\lambda < 0.48$ では $\gamma_1 = 3.3 \frac{d_D^3}{\lambda^2 x}$ 、 $0.48 < d_0/\lambda < 4.6$ では

$$\gamma_1 = \frac{\pi d_D^2}{2\lambda x}, \quad d_0/\lambda > 4.6 \text{ では } \gamma_1 = 1 \quad \dots (34)$$

9.2 球形欠陥の場合の傷の反射率

球形欠陥(直径 d_s)の場合はStenzel[6]によって解かれてい

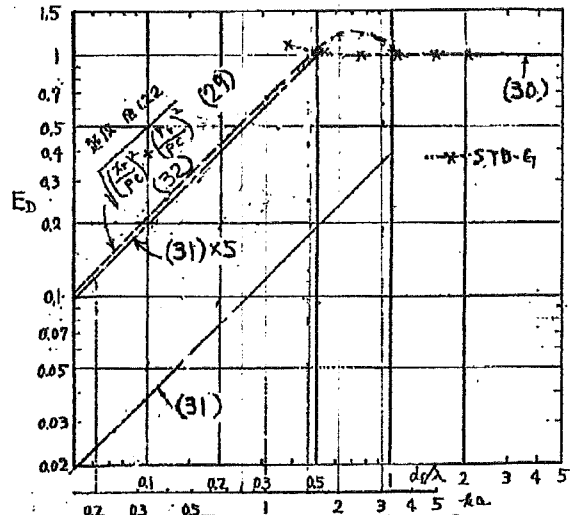


図4 円形平面欠陥に対する波長比係数の値

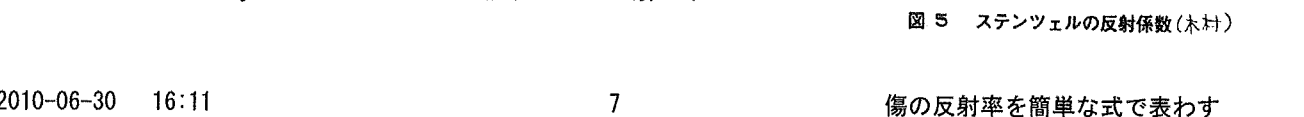


図5 ステンツェルの反射係数(木村)

る。その結果を使うと、傷の反射率は

$$\gamma_2 = \frac{d_s}{x} |z| \dots\dots\dots (35)$$

ここで、 z は Stenzel の反射係数 (又は Z 関数 [13]) と呼ばれており、その絶対値は図 5 に示すとおりである。この曲線は、2本の直線 $|z|=0.83(kx)^2$ と $|z|=1$ で近似できるので、それを破線で示した。

$$d_s/\lambda < 0.25 \text{ では } \gamma_2 = 8.2 \frac{d_s^3}{\lambda^2 x}, \quad 0.25 < d_s/\lambda < 68 \text{ では } \gamma_2 = \frac{d_s}{2x}, \quad d_s/\lambda > 68 \text{ では } \gamma_2 = 1 \dots (36)$$

係数 8.2 は加藤 [11] によると思われるが、古い一トを捨ててしまったので確認できない。Ermolov [2] によれば、係数 8.2 が 8.6 となる。

9.3 帯状平面欠陥の場合の傷の反射率

9.3.1 帯状欠陥の波長比係数

ステンレス鋼の拡散接合の状態を超音波で評価 [15] することを試みていたとき、研磨仕上げを行ったため、接合部は幅の狭い帯の集合体となっている。これを Photo. 1 に示す。

そして、帯の幅 W が波長の $1/5$ 以下となると、写真の下の reflectivity として記したように、反射しにくくなることが分かった。これを波長比係数として示したのが図 6 である。

これが、NDI 資料 2666 [1] を作成した根拠となった。

帯状欠陥の場合に、Ermolov は 1974 年の論文 [2] では、帯の幅 $W < 0.2\lambda$ の場合の K_R については書いていなかった。

帯状欠陥の場合には、大橋らの拡散接合に関する報告 [15] がある。木村は、その研究に超音波探傷の立場で参加した。その実験結果を整理したものが図 6 である。○と●が実験結果である。2本の細い実線は、 W/λ が小さいときの実験結果のばらつき範囲を示している。

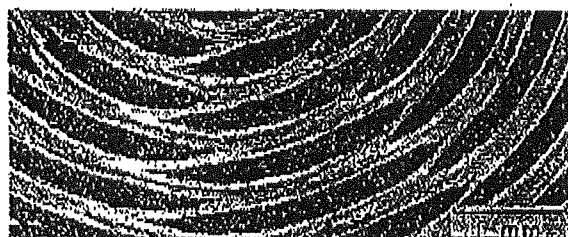
図中の太い一点鎖線はその中央に引いた線であり $E_R = 5W/\lambda \dots (37A)$ と表わせる。

$W > 2\lambda$ のときの K は W/λ であるので、 $W < 0.2\lambda$ のときの K は $K_R = W/\lambda \times 5W/\lambda = 5(W/\lambda)^2$ となる。Ermolov のハンドブック [10] では $K_R = 4.9(W/\lambda)^2$ と書いており、 $K_R = 5(W/\lambda)^2$ と殆ど一致する。

9.3.2 帯状欠陥の傷の反射率

$W > 2\lambda$ のときには $\gamma_3 = W \sqrt{\frac{2}{\lambda x}}$ であるので、

$W < 0.2\lambda$ のときには、式 (37A) と組み合わせて



(A)



(B)

Photo. 1 Fractograph of joints by scanning electron microscope.

(A)	(B)
Rmax: 80 μ m	Rmax: 4 μ m
joint efficiency: 52 %	joint efficiency: 51 %
reflectivity: 52 %	reflectivity: 8 %

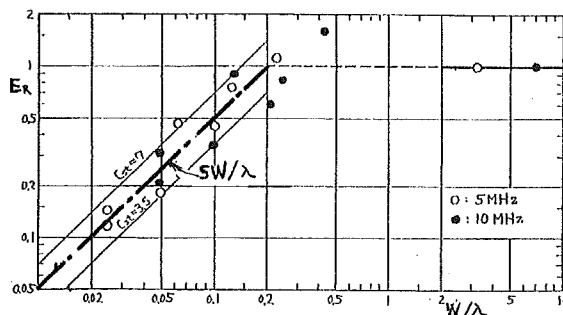


図 6 長い帯状欠陥に対する波長比係数の値

$$\gamma_3 = W \sqrt{\frac{2}{\lambda x}} \times 5 \frac{W}{\lambda} = 7.1 \frac{W^2}{\sqrt{\lambda^3 x}} \dots\dots\dots (37)$$

となる。Ermolov[10]によれば、 $\gamma_3 = W \sqrt{\frac{2}{\lambda x}} \times \left(4.9 \frac{W^2}{\lambda^2} / \frac{W}{\lambda} \right) = \frac{6.9 W^2}{\sqrt{\lambda^3 x}}$ であるから、係数 7.1 が 6.9 となる。

以上を整理すれば、

$$W/\lambda < 0.20 \text{ では } \gamma_3 = 7.1 \frac{W^2}{\sqrt{\lambda^3 x}}, \quad 0.20 < W/\lambda < 4.1 \text{ では } \gamma_3 = W \sqrt{\frac{2}{\lambda x}}, \quad W/\lambda > 4.1 \text{ では } \gamma_3 = 1 \dots (38)$$

9.4 円柱形欠陥（横穴）（直径 d）の場合の傷の反射率

円柱形欠陥（横穴）（直径 d）の場合

$d_c/\lambda < 0.2$ の場合には、Ermolov のハンドブック [4] によれば、 $K_6 = 7.4 (d_c/\lambda)^2$ $K_c = 7.4 \left(\frac{d_c}{\lambda} \right)^2$ である

から、式(21)により

$$\frac{P_{c2}}{P_0} = K_c \frac{A}{x^{1.5} \sqrt{2\lambda}} = 7.4 \left(\frac{d_c}{\lambda} \right)^2 \frac{A}{x^{1.5} \sqrt{2\lambda}} = 5.23 \frac{d_c^2}{\lambda^2} \frac{A}{x^{1.5} \sqrt{\lambda}} = 5.23 \frac{A d_c^2}{\lambda^{2.5} x^{1.5}} = 5.23 \frac{A}{2\lambda x} \frac{2\lambda x d_c^2}{\lambda^{2.5} x^{1.5}} = \frac{A}{2\lambda x} \cdot 10.5 \frac{d_c^2}{\lambda^{1.5} x^{0.5}} \quad (39)$$

$$\therefore \gamma_4 = 10.5 \frac{d_c^2}{\sqrt{\lambda^3 x}} \dots\dots\dots (40)$$

したがって

$$d_c/\lambda < 0.17 \text{ では } \gamma_4 = 10.5 \frac{d_c^2}{\sqrt{\lambda^3 x}}, \quad 0.17 < d_c/\lambda < 68 \text{ では } \gamma_4 = \sqrt{\frac{d_c}{2x}}, \quad d_c/\lambda > 68 \text{ では } \gamma_4 = 1 \dots (41)$$

なお、円柱形欠陥による反射については、A. S. Golubev の詳しい研究 [12] がある。また、加藤による詳しい研究もある [11]。しかし、面倒な式なので、未だ数値計算をしていない。

10. まとめ

以上の結果を、探触子が 2M20N で、欠陥までの距離が 100mm の場合について示すと、図 7 のようになる。図中の曲線の部分は、三角関数、フレネル積分や Z 関数を用いた詳しい理論に依るものである。円形平面欠陥の場合に、直径が 15 mm 以上になると、+6dB から -20dB の範囲に激しく振動するようになるが、パルスの場合には、これほど振動しない筈である。そして、 $\gamma = 1$ に収斂する筈である。

欠陥が極めて小さいときの急傾斜の線から、波長以上のときの緩やかな傾斜の線に、突然変わるわけではなく、球の場合に示されているように、幾らか振動しながら移行するのであろう。しかし、超音波探傷で欠陥の大きさを評価する場合には、直線で描いてある線で充分であらう。

2M20Nの場合

円板 $d_D/\lambda < 0.48$ では $\gamma_1 = 3.3 \frac{d_D^3}{\lambda^2 x}$ 、 $0.48 < d_D/\lambda < 4.6$ では $\gamma_1 = \frac{\pi d_D^2}{2\lambda x}$ 、 $d_D/\lambda > 4.6$ では $\gamma_1 = 1$ … (34)

球 $d_S/\lambda < 0.25$ では $\gamma_2 = 8.2 \frac{d_S^3}{\lambda^2 x}$ 、 $0.25 < d_S/\lambda < 68$ では $\gamma_2 = \frac{d_S}{2x}$ 、 $d_S/\lambda > 68$ では $\gamma_2 = 1$ …… (36)

帯 $W/\lambda < 0.20$ では $\gamma_3 = 7.1 \frac{W^2}{\sqrt{\lambda^3 x}}$ 、 $0.20 < W/\lambda < 4.1$ では $\gamma_3 = W \sqrt{\frac{2}{\lambda x}}$ 、 $W/\lambda > 4.1$ では $\gamma_3 = 1$ (38)

円柱 $d_C/\lambda < 0.17$ では $\gamma_4 = 10.5 \frac{d_C^2}{\sqrt{\lambda^3 x}}$ 、 $0.17 < d_C/\lambda < 68$ では $\gamma_4 = \sqrt{\frac{d_C}{2x}}$ 、 $d_C/\lambda > 68$ では $\gamma_4 = 1$ … (41)

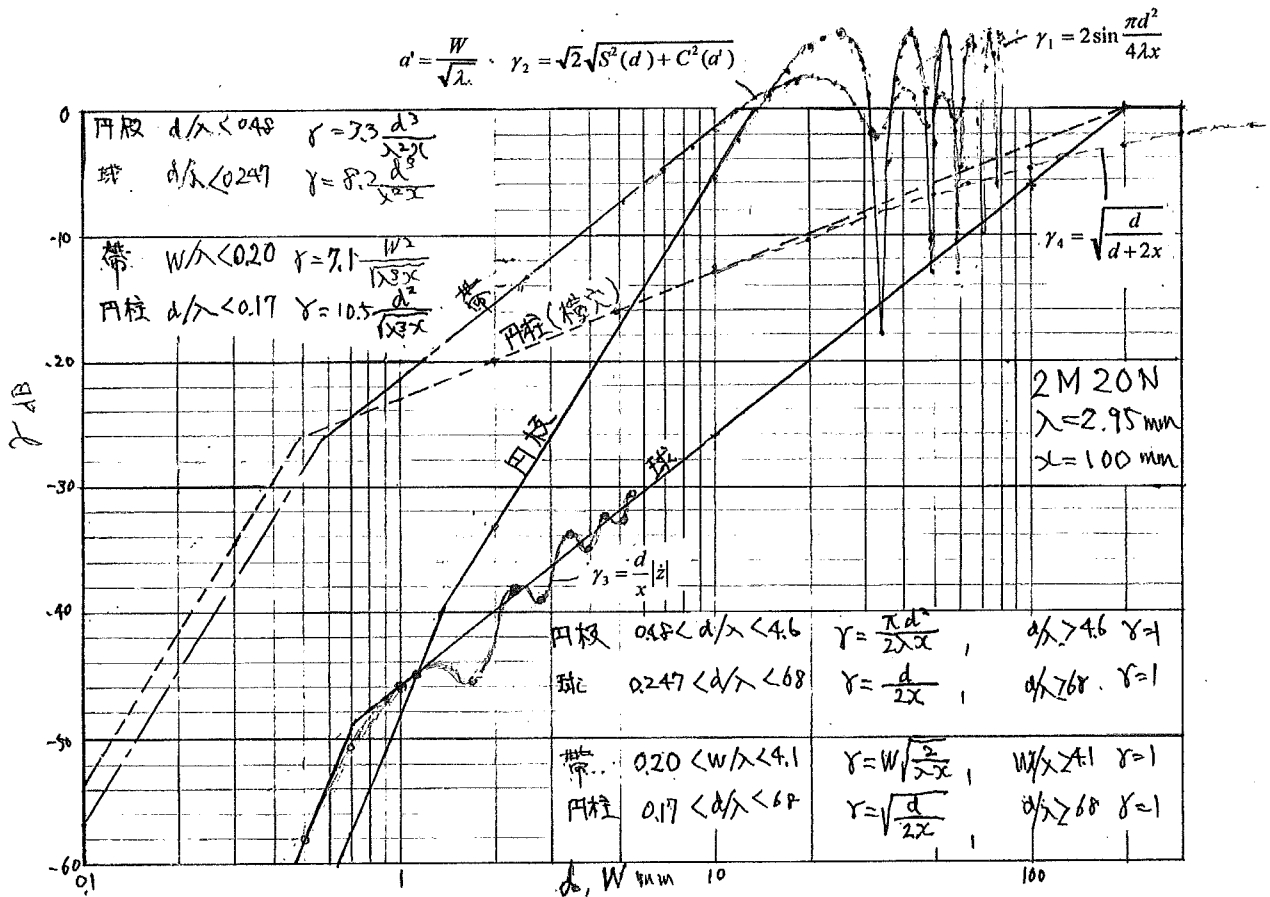


図7. 傷の反射率に及ぼす欠陥の形状と寸法の影響

直線で描いてある線が上記の式に依るものである。図中の曲線の部分は、三角関数やフレネル積分などを用いた詳しい理論に依るものであり、振動するようになるが、パルスの場合には、これほど振動しない筈である。そして、 $\gamma = 1$ (0 dB) に収斂する筈である。

そして、検出下限となる欠陥の大きさは、組織での散乱による林状エコーレベル図 2.56 [5] 又は探傷器の電気ノイズレベルで決定される。なお、図 2.56 は Ermolov らの理論式 [16] と松本らの実験結果 [17] を編集したものである。

参 考 文 献

- [1] 木村勝美：欠陥寸法と波長との比で定まる係数の導入による超音波探傷理論の整理について、NDI 資料 2666 (1978)
- [2] I. N. Ermolov: The Reflection of Ultrasonic Waves from Targets of simple Geometry, *Nondestructive testing*, 5, pp. 187-191 (1972); 和訳：非破壊検査, 23, pp. 577-580 (1974)
- [3] 日本学術振興会：超音波探傷法、改訂新版、日刊工業新聞社 (1974), pp. 41-50
- [4] 実吉純一：音波及び超音波の反射 について、日本音響学会誌、Vol. 4, No. 12, pp. 1-8 (1943)
- [5] 日本非破壊検査協会：超音波探傷試験Ⅲ (2001), pp. 65-70, 51-53.
- [6] H. Stenzel: Über die von einer starren Kugel hervorgerufene Störung des Schallfeldes, *Elektr. Nachr. Techn.*, 15, p. 71 (1938); ステンツェル著、早坂&小林共訳：音響指向特性の計算、コロナ社、(1944), p. 120; 日本学術振興会：超音波探傷法、丸善 (1956), p. 124.
- [7] I. N. Ermolov: Application of a scalar sound field for the analysis of the acoustic path of an ultrasonic flaw detection, *Soviet Physics Acoustics*, Vol. 5, No. 2, pp. 248-250 (1959)
- [8] 木村勝美：垂直探触子の AVG 線図の計算、非破壊検査、Vol. 27, pp. 667-671. (1978)
- [9] W. Morgan: ~~Some factors of importance in ultrasonic testing, Nondestructive Testing, Vol. 12, No. 3 (1954), pp. 13-18.~~
- [10] I. N. Ermolov, A. Kh. Vopilkin and V. G. Badalyan: Calculations in ultrasonic testing, Scientific and Production Center "Echo+", Moscow-2000
- [11] K. Kato: *Memoirs of the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University*, IX, pp. 16-20 (1952) (円柱) および X, pp. 46-20 (1953) (球)
- [12] A. S. Golubev: Reflection of plane waves from a cylindrical defect, *Soviet Physics-Acoustics*, Vol. 6, No. 2, pp. 138-142. (1962)
- [13] 実吉純一、菊池喜充、能本乙彦編：超音波技術便覧、改訂新版、日刊工業新聞社 (1966), pp. 52-59, 32-34
- [14] 日本学術振興会：学振Ⅲ型超音波探傷用感度標準試験片に関する研究報告書 (1963), p. 108.
- [15] 大橋 修、橋本達哉、木村勝美、松本庄次郎：拡散溶接に関する研究 (第 7 報)-ステンレス鋼拡散溶接部の超音波探傷、溶接学会誌、溶接学会誌、Vol. 48, pp. 182-186 (1979).
- [16] I. N. Ermolov and B. P. Pilin: Ultrasonic Inspection of materials with coarse grain anisotropic structures. *NDT international*, Dec. (1976) pp. 275-280.
- [17] 松本、木村：減衰定数と雑音エコーとの関係について、非破壊検査、13 (1979) p. 238.

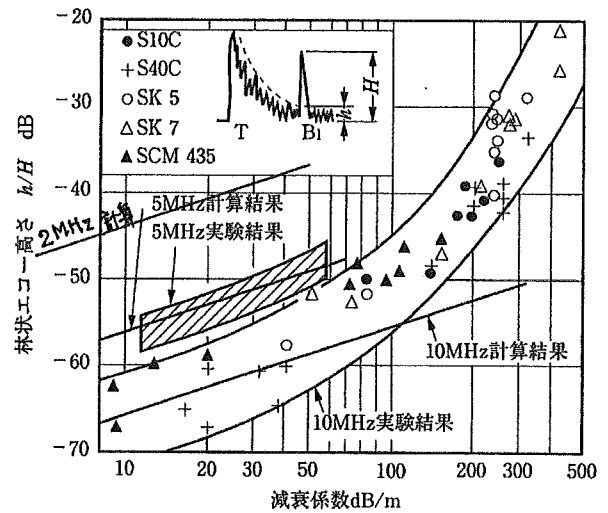


図2.56 林状エコー高さと減衰係数との関係 (木村)

10M10Nの場合 境界条件の表現を変えたが、実質は変わらない。

$$\text{円板 } \frac{d_D}{\lambda} \leq 0.4760 \text{ では } \gamma_1 = 3.3 \frac{d_D^3}{\lambda^2 x}, \quad 0.4760 \leq \frac{d_D}{\lambda} \leq \sqrt{\frac{2x}{\pi\lambda}} \text{ では } \gamma_1 = \frac{\pi d_D^2}{2\lambda x}, \quad \frac{d_D}{\lambda} \geq \sqrt{\frac{2x}{\pi\lambda}} \text{ では } \gamma_1 = 1 \dots (34)$$

$$\text{球 } \frac{d_s}{\lambda} \leq 0.2469 \text{ では } \gamma_2 = 8.2 \frac{d_s^3}{\lambda^2 x}, \quad 0.2469 \leq \frac{d_s}{\lambda} \leq \frac{2x}{\lambda} \text{ では } \gamma_2 = \frac{d_s}{2x}, \quad \frac{d_s}{\lambda} \geq \frac{2x}{\lambda} \text{ では } \gamma_2 = 1 \dots (36)$$

$$\text{帯 } \frac{W}{\lambda} \leq 0.1992 \text{ では } \gamma_3 = 7.1 \frac{W^2}{\sqrt{\lambda^3 x}}, \quad 0.1992 \leq \frac{W}{\lambda} \leq \sqrt{\frac{x}{2\lambda}} \text{ では } \gamma_3 = W \sqrt{\frac{2}{\lambda x}}, \quad \frac{W}{\lambda} \geq \sqrt{\frac{x}{2\lambda}} \text{ では } \gamma_3 = 1 \dots (38)$$

$$\text{円柱 } \frac{d_c}{\lambda} \leq 0.1655 \text{ では } \gamma_4 = 10.5 \frac{d_c^2}{\sqrt{\lambda^3 x}}, \quad 0.1655 \leq \frac{d_c}{\lambda} \leq \frac{2x}{\lambda} \text{ では } \gamma_4 = \sqrt{\frac{d_c}{2x}}, \quad \frac{d_c}{\lambda} \geq \frac{2x}{\lambda} \text{ では } \gamma_4 = 1 \dots (41)$$

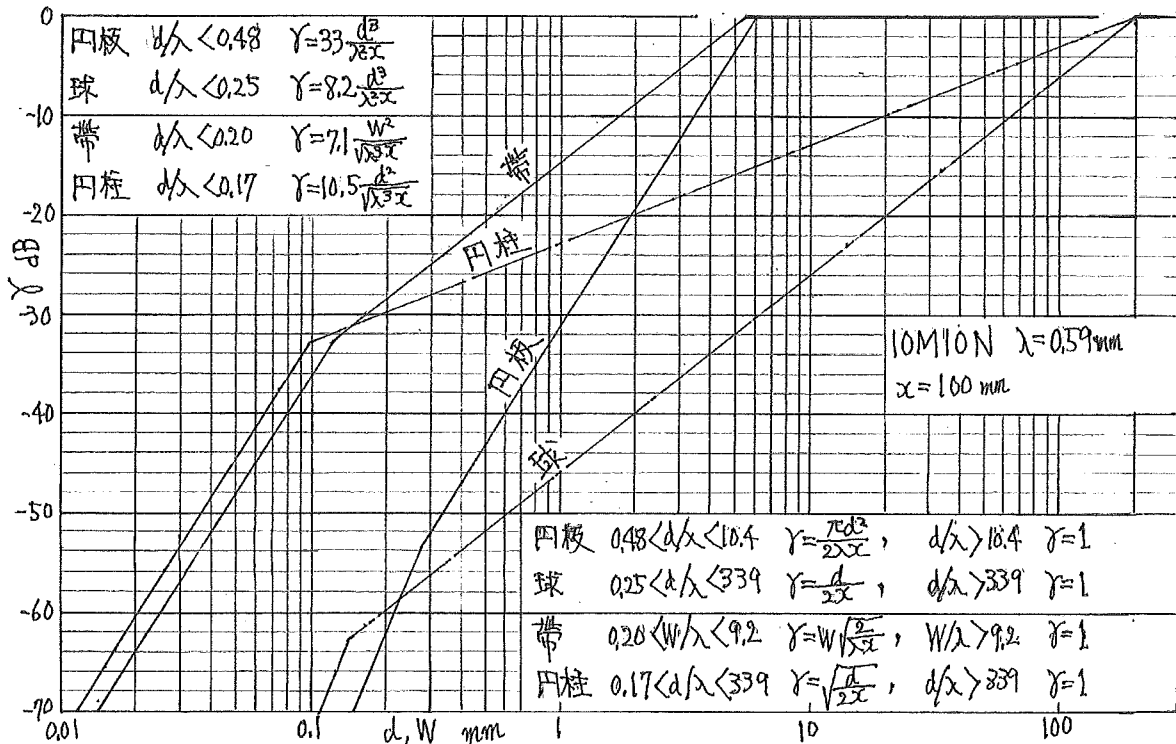


図8 傷の反射率に及ぼす欠陥の形状と寸法の影響

この図は上記の式に依るものである。詳しい理論に依ると、円板および帯の場合には、欠陥が大きくなって γ が1 (0 dB)になると振動するようになるが、パルスの場合には余り振動しない筈である。そして、 $\gamma = 1$ に収斂する筈である。

検出下限となる欠陥の大きさは、組織での散乱による林状エコーレベル(右図) [5] 又は探傷器の電気ノイズレベルで決定される。

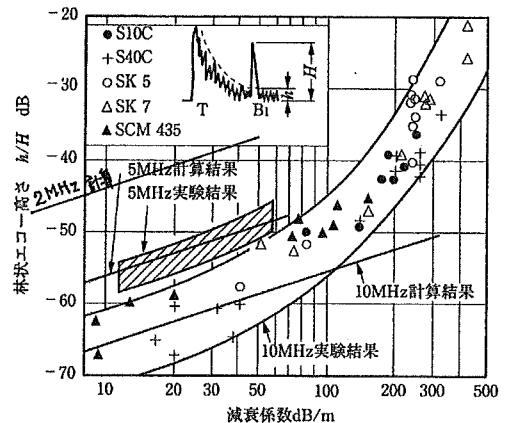


図2.56 林状エコー高さと減衰係数との関係(木村)
傷の反射率を簡単な式で表わす