

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。 2001. 6. -6

[技術情報室]

# AE測定用導波棒の特性試験(第2報)

1979年3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

TN841-79-19

1979年3月



## AE測定用導波棒の特性試験(第2報)

実施責任者 三浦 信

報告者 佐藤 政一

五十嵐 幸

近藤 吉隆

### 期 間

1978年1月～1978年5月

### 目 的

ACOUSTIC EMISSION 検出用の長尺導波棒の減衰率および導波棒内での音波の伝播モードや波形変化についての解明を目的とする。

### 要 旨

AE 信号の検出等に使用される導波棒は、長くなると内部での減衰や、板波の発生などにより AE 信号波形に影響を与える。

本研究はそのような影響を明らかにするため、長さ 2 m の導波棒について AE 信号伝播特性を調べることを目的としたものである。

その結果、導波棒自身の減衰率は、測定法に多少問題はあるものの  $1 \sim 1.5 \text{ dB/m}$  以下という小さな値であった。

伝播モードは細い棒中での理論上の縦波音速度とかなり一致する測定値が得られた。このことは、導波棒内での主要な伝播モードは板波の一種であることを示している。

また波形分離の現象は、直径と関連しつつ起きていた。太い導波棒より細い導波棒の方が、この波形分離の現象も少なく、良い結果を示すことがわかった。

## 目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2-1 使用機器	2
2-2 試料	2
2-3 測定法	3
3. 試験結果	5
3-1 ステンレス鋼丸棒 3 mm $\phi$ 200 mm $l$ の結果	5
3-2 ステンレス鋼丸棒 5 mm $\phi$ 2000 mm $l$ の結果	5
3-3 アルミニウム丸棒 3 mm $\phi$ 2000 mm $l$ の結果	6
3-4 アルミニウム丸棒 5 mm $\phi$ 2000 mm $l$ の結果	6
3-5 ステンレス鋼製 6.3 mm $\phi$ 0.35 mm $t$ 2000 $l$ パイプの結果	7
4. 考 察	20
4-1 減衰について	20
4-2 音速度について	24
4-3 管と板との比較	26
4-4 測定誤差	41
5. ま と め	42
6. 参考文献	43

## 1. はじめに

ACOUSTIC EMISSION (以下A. E.) 信号を導波棒を使用して検出すると、その検出波形は導波棒により種々の影響を受け、導波棒を使用しない場合に比べかなり変化する。

その中で計測に対し最も重要な要因は、第1に導波棒自身の減衰作用である。導波棒での減衰が大であるならば、A. E. 信号は検出されないという事も考えられる。これについては今までである程度、実験を行ってきたが、導波棒の寸法等による差は明らかにできなかった。また試験した導波棒も長さ 50 cm までの短いものであり、導波棒のとり付け部までを含んだ特性を求めていた<sup>(1)</sup>。

次に導波棒を通過したために波形がなまったり、分離したりするなどの波形の変化の問題がある。導波棒のような細い棒中での超音波の伝播は、無限大媒体での伝播とは異なり、板波に近い伝播をすることが明らかになっている<sup>(2)</sup>。板波は周波数により音速度が異っており、長い距離を伝播すると、音速度差により波形が複数個に分離することもあり得る。こうなると、1つのAE信号が複数個に計数されることになり計測に悪影響を及ぼす。

本試験は、長尺の導波棒自身の減衰特性の評価とともに、長尺導波棒において板波等による波形の分離などがあるかどうかを調べるため、導波棒内での多重反射波の波高値および時間差の測定を行った。

その結果、減衰特性は正確に測定することができなかったが、導波棒中の伝播は「棒中の縦波」が主であること。また、板波の分離が直径等に影響されることがわかったのでここに報告する。

## 2. 試験方法

### 2-1 使用機器

1) トランスデューサー

NORTEC社製 D-Z-210 (受信用)

AE-Z 1/8 (送信用)

2) 前置増幅器

NORTEC社製 NDT-257W 広帯域型 (10KHz~3MHz GAIN 50 dB)

3) シンクロスコープ

岩崎通信機 SS-5157

4) スペクトラムアナライザー

TEAC社製 C-120 + F-120 (DC~1MHz)

5) 記録計

BRUSH社製 MARK 220

6) デジタルメモリ

岩崎通信機 DM-701 (DC~1MHz)

7) パルサー

### 2-2 試料 (導波棒)

これまで長さ 50 cm 以下の導波棒について試験を行ってきたが、今回は、音速度分散による波形分離を確認するために長さ 2 m の丸棒とパイプを使用した。丸棒の直径は実用性を考え 3 および 5 mm の 2 種類を選んだ。

実用化する場合の材質はステンレス鋼が主になるが、減衰の少ないアルミニウムを比較のために試験した。パイプは高速炉燃料用のステンレス製被覆管を使用して試験を行った。

表 1 ~ 3 に導波棒の寸法および化学成分を示す。

表-1 導波棒寸法

材質	形状	直径	長さ	備考
SUS 304	丸棒	3 mm	2000 mm	
		5 mm	"	
アルミニウム	丸棒	3 mm	"	
		5 mm	"	
SUS 316	管	6.3 mm (肉厚 0.35 mm)	"	
			1000 mm	
			"	全長たて割り

表-2 ステンレス丸棒の化学成分

項目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
化学成分(%)	0.04	0.64	1.52	0.036	0.003	18.39	9.44

表-3 アルミニウム丸棒の化学成分(%)

項目 棒種	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti
Al 3mmφ	0.002	0.065	0.163	0.064	4.89		0.069	0.045
Al 5mmφ	0.006	0.083	0.203	0.069	4.65		0.069	0.042

### 2-3 測定法

測定は導波棒の両端にトランスデューサーをとりつけ、その一方にパルスを入力し音源用とし、もう一方は検出用として行った。今までの試験では、導波棒を母材になんらかの方法でとりつけ、その母材に模擬のAE波を伝播させ、導波棒を伝わった後の音波を検出していたが、この方法では導波棒のとりつけ部などの影響があった。今回の試験は導波棒自身の特性を調べるということを目的としたので単純な方法を採用した。

検出されたA E波は前置増幅器で増幅した後、シンクロスコープによって振幅・時間差を測定した(図・1にブロック図を示す)。また必要に応じて、波形をデジタルメモリに記録・再生してスペクトラムアナライザによりパワースペクトラムを求めた。

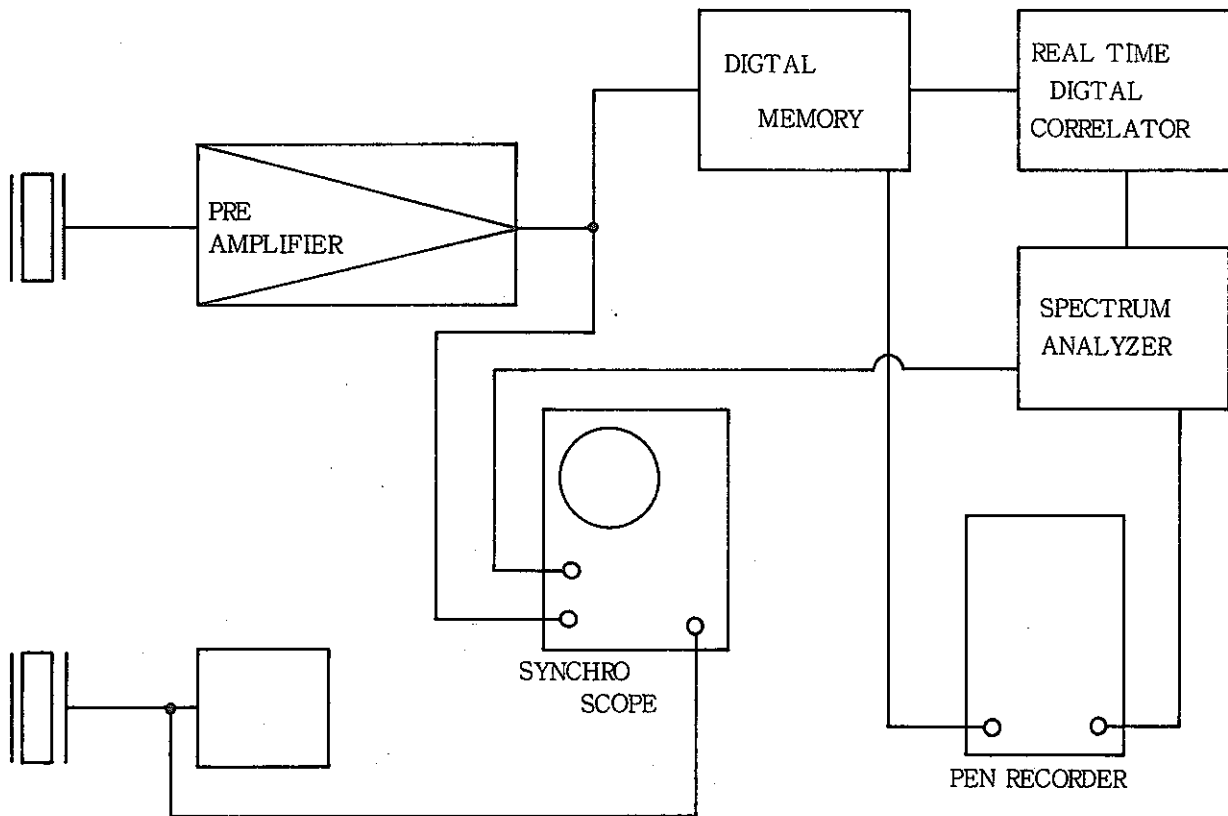


図-1 測定ブロック図

減衰の測定は、導波棒の長さを変えて測定するのではなく、今回の試験では導波棒内で起きていた多重反射の反射波を利用して求めることとした。音速度の測定もまた多重反射波を利用して求め、その平均をもって測定値とした。多重反射のなかった波については音源用パルスの発生時からの時間を測定し、音速の算出を行った。

トランスデューサーは2種類、計6個を使用し、組み合わせについては統一しなかった。これは測定に多重反射波を利用しているのでトランスデューサーの影響は無視できると考えられるためである。



### 3. 試 験 結 果

#### 3-1 ステンレス鋼棒 3 mm $\phi$ 2000 mm l の結果

導波棒伝播後に検出された信号波形は 10 数個に分離した。写真 1 にその結果を示す。これらの波の到達時間を音源用パルスの発生時刻より追ってゆくと、各波の到達時間差が 0.735 ~ 0.74 msec と 1.31 ~ 1.32 msec の 2 つのグループの波があることがわかった。表-4 に到達時間差および音速度を示す。これは、1 つの音源より 2 種類のモードの音波が発生・伝播しているとともに、それらの音波が導波棒端で多重反射していることを示している。

この音波のモードを調べるために音速度を算出した結果、平均音速度はそれぞれ 5423 m/sec, 3053 m/sec という値となった。各グループ内での音速度のバラツキは平均音速を中心におのおの +56, -18 m/sec, +24, -23 m/sec ときわめて小さかった。この平均音速度をステンレス鋼の代表的な「たて波<sup>(2)</sup> (5660 m/sec), よこ波<sup>(2)</sup> (3120 m/sec)」音速度と比較すると、この値よりも 218 m/sec および 67 m/sec 遅い値である。しかし、この程度の差は、測定誤差、材質や温度などにより容易に現われるものであることから、この 2 つの多重反射波は「たて波」「よこ波」と推定できる。

多重反射波の各波の波高値から減衰率を算出すると、たて波で最大 -2.4 dB/m, よこ波で -3.3 dB/m とそれほど大きな値とはならなかった。表-5 にその結果を示す。平均値を求めた結果、たて波は -1 dB/m 以下、よこ波は -3 dB/m 以下となった。またこの結果から、たて波より、よこ波の方が減衰が大きいことがわかった。

多重反射波の各波の中は 50 ~ 70  $\mu$ sec と短い。立ち上りは鋭く、リングングも少なく、きれいな波形をしている。

#### 3-2 ステンレス鋼丸棒 5 mm $\phi$ 2000 mm l の結果

波形は写真-2 に見られるように 10 程度に分離しており、この中には、各波間の到達時間差が 0.795 ~ 0.8 msec のグループが見られた。これも 3-1 の場合と同じく多重反射によるものと思われる。このグループの音波の平均音速度を算出すると 5025 m/sec となった。グループ内でのバラツキは +38, -25 m/sec ときわめて小さく信頼できる値と思われた。しかし、ステンレス鋼のたて波音速度と比較すると 635 m/sec も遅い値である。3-1 の 3 mm  $\phi$  の音速度よりも 398 m/sec 遅くなっている。これだけの差が出てくると誤差範囲内とは言えず、この多重反射波はたて波ではなく別のモードの波としか判断できない。表-6 に時間差と音速度を示す。

また、3 mm  $\phi$  の時に見られたよこ波の多重反射は 5 mm  $\phi$  では起らなかった。逆に 3 mm  $\phi$

には、よこ波しかなかった第1到達波とその多重反射波の最初の波の間に大きく3つの波が存在している。この中で最も速い音波の音速度は3175 m/secである。これはステンレス鋼のよこ波音速度より55 m/sec 速いだけでほぼ等しい。したがって、この第2到達波はよこ波と判断できる。第3、4到達波の音速度は2500 m/sec 台であり、第1到達波と同様にどんなモードの音波であるかは不明である。

多重反射波の波高値より減衰率を求めると表-7に示すような結果となる。減衰率は最大でも-1.6 dB/m 以内であり、平均では-1 dB/m 以下である。3-1と同じく減衰率は小さい。

波形の特徴は、写真-2からもわかるように、3 mmφ に比べて各波のリングングが長いことである。例えば、多重反射波の第1波は約0.15 msec の幅をもっているが、これは3 mm φの時に比べ2倍以上もあることになる。また第1~4到達波は、その波のリングングが終了する以前に次の波が始まっており、波の正確な開始点や幅などは読みとれなかった。

### 3-3 アルミニウム棒 3 mm φ 2000 mm l の結果

ステンレス鋼棒と比べて波形の分離は写真-3を見てもわかるように4程度しかなくきわめて少ない。しかし、この中でも波数は少ないが、各波間の到達時間差が0.78 msec の波のグループがあり、ここでも音波の多重反射が起きている。表-8にその時間差と音速度を示す。この多重反射波の平均音速度は5150 m/sec であり、バラツキは+45 m/sec、-22 m/sec と小さく信頼できる値と思われる。しかし、この音速度は、アルミニウムのたて波音速度<sup>(2)</sup>6260 m/sec と比べると1110 m/sec も遅く、かといってよこ波音速度ともかけ離れている。これも3-2のステンレス鋼棒(5 mm φ)と同様に別モードの波としか考えられない。

多重反射を行っている音波とは別に第1到達波の後に音速度が3200 m/sec の波がある。この音速度はアルミニウムのよこ波音速度3080 m/sec より120 m/sec 速い値である。いくぶん差は大きいですが、この第2到達波は「よこ波」であると考えられる。

多重反射波による減衰の測定では最大-3.7 dB/m、最小-1.7 dB/m で平均でも-2.5 dB/m 前後とステンレス鋼棒の場合より2倍近い大きな値を示している。表-9にこれを示す。

各波の幅は第3到達波を除いて他は、50 μsec 程であり、リングングも少なくきれいな波形をしている。第3到達波はリングングか、別の波が重なっているのかは分からないが0.13 m sec 程の幅をもっている。もしも別の波だとすれば、その音速度は1700 m/sec 程度となる。

### 3-4 アルミニウム棒 5 mm φ 2000 mm l の結果

ステンレス鋼棒と同じように波形は10程度に分離した(写真-4)が、リングングがステンレス鋼棒(5 mm φ)よりもなかつた。特に第1到達波は、その後0.6 msec 程も波が連続しており、判別はしにくいですが、この中には、少なくとも3つの波が含まれていると考えられた。

① その一つは、音速度が5263 m/sec の第1到達波である。

- ② 第1到達波のリングングの終りかけたころ、音速度 4000 m/secの波が来ている。
- ③ 最後に音速度が約 2670 m/sec の波がある。これは幅が約 0.26 msec もあり、リングングも一度小さくなって再び振幅が大きくなり、急に終るといった形であり一般的なリングングの形とは異っている。

この3つの波の中にも、また別の波ではないかと思われるものが含まれているが、到達時間などがはっきりせず区別できないので省略する。

表-10 に各波の到達時間および音速を示す。第1到達波に注目すると、これから 0.775 ~ 0.785 msec の到達時間差をもった波のグループがある。これは今までと同様に多重反射によるものである。このグループの平均音速度は 5155 m/sec であり、アルミニウム棒 (3 mm $\phi$ ) との差は 5 m/sec と非常に近い値となっている。したがってこの波も「たて波」でなく、アルミニウム棒 (3 mm $\phi$ ) の多重反射波と同一モードの波である。音速度のバラツキは +108 m/sec、-59 m/sec と他の棒材の2倍ほど大きい、一応誤差範囲内にあると言える。

第1到達波とその多重反射の最初のエコーの間にある2つの波 (音速度 4000 m/sec および 2670 m/sec) は音速度から考えてよこ波ではないと思われた。アルミニウムの表面波音速度は 2880 m/sec<sup>(2)</sup> であり、音速度 2670 m/sec の波はそれに近いが 200 m/sec も差があり断定はできなかった。

多重反射波の間にも別の波があるが、この音速度は直接の波であるならば 1000 m/sec 以下である。また、他の波の多重反射波として成り立つような波も存在しないので、この発生原因とか、音速度は測定できないので不明である。

多重反射による減衰の測定は、最大で -1.9 dB/m であり、アルミニウム棒 (3 mm $\phi$ ) より小さい。また多重反射波の波形を見ていくと、3回目以後は一周期約 0.02 msec (50 KHz) のきわめて周波数の低い波が 1.5 波長ほどしか検出されていない。それ以前は最初にこの周波数の低い波が検出され、その後に周波数の高い波が続いて検出されていた。つまり、高い周波数の波ほど減衰しやすいと言える。表-11 に減衰率を示す。

### 3-5 ステンレス鋼製パイプ (6.3 mm $\phi$ 0.35 mmt 2000 mm l) の結果

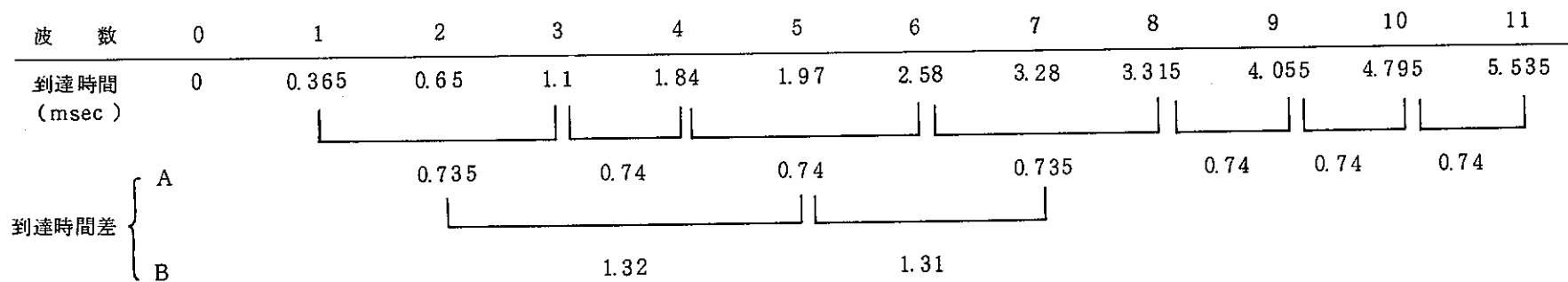
写真-5 に見られるように、管状の導波棒は他の丸棒の導波棒とは波形がまったく異っていた。最初に音速度 5195 m/sec の第1到達波があり、それより約 0.6 msec 以降に 10 数個の波がリングングも含めて約 1 msec の間続く。丸棒状の導波棒に見られた、第1到達波の多重反射は見られなかった。表-12 に各波の到達時間を示す。

最初の波は音速度より、「たて波」でないことは明らかである。むしろ丸棒のときの第1到達波やその多重反射波の音速度に近い値であることから、音波のモードもそれらに近いものであろうと思われる。第2到達波以降の波は音速度が 2000 m/sec 以下である。したがって「よこ波」とは 1000 m/sec 以上も差があるので、よこ波ではない。同様に「表面波音速度」とも 900

m/sec 以上も差があるのでこれもあり得ない。また、写真-6 に示すように、管の表面にガムテープ等を貼りつけることにより、第2到達波以降の波は、ほぼ完全に消えてしまう。さらに多重反射でなく音速度の異なる波が多数現われていることなどから、第2到達波以降の波は板波ではないかと推測される。

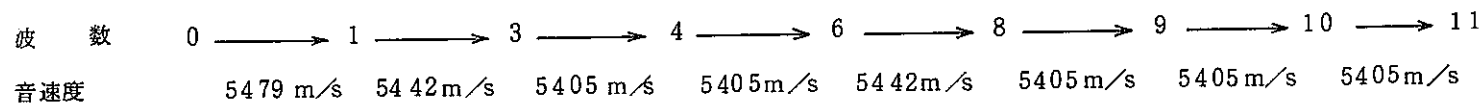
表-4 ステンレス鋼 3φ2000ℓ 丸棒導波棒での多重反射波の時間差および音速度

1. 時間差



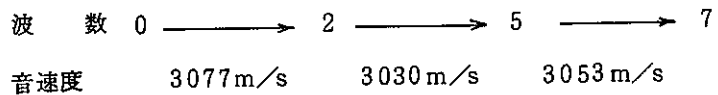
2. 音速度

○A群音速度



A群平均音速度 5423 m/sec

○B群音速度



B群平均音速度 3053 m/sec

表-5 ステンレス鋼 3φ 2000ℓ丸棒導波棒での多重反射波の減衰率

## 1. 各波の波高値

波 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
+側電圧 (V)	2.3	1.7	1.4	1.2	0.45	0.4	0.12	0.4	0.24	0.18	0.14
-側電圧 (V)	2.1	1.9	1.5	0.6	0.42	0.7	0.12	0.3	0.24	0.18	0.14
P-P電圧(V)	4.4	3.6	2.9	1.8	0.87	1.1	0.24	0.7	0.48	0.36	0.28

## 2. 減衰率

## ○A 群

波 数	1	3	4	6	8	9	10	11
減衰率	+ 側	- 1.08dB/m	- 0.33dB/m	- 2.39dB/m	0 dB/m	- 1.11dB/m	- 0.62dB/m	- 0.55dB/m
	- 側	- 0.73dB/m	- 1.99dB/m	+ 0.33dB/m	- 1.84dB/m	- 0.48dB/m	- 0.62dB/m	- 0.55dB/m
	P-P	- 0.91dB/m	- 1.04dB/m	- 1.07dB/m	- 0.98dB/m	- 0.82dB/m	- 0.62dB/m	- 0.55dB/m

## ○B 群

波 数	2	5	7
減衰率	+ 側	- 2.89dB/m	- 2.87 dB/m
	- 側	- 3.28dB/m	- 2.72dB/m
	P-P	- 3.08dB/m	- 2.8 dB/m

表-6 ステンレス鋼 5φ 2000ℓ 丸棒導波棒での多重反射波の時間差および音速度

1. 時間差

波数	0	1	2	3	4	5	6	7	8
到達時間 (msec)	0	0.395	0.63	0.77	0.8	1.195	1.995	2.79	3.585
到達時間差 (msec)		0.8				0.8	0.795	0.795	

2. 音速度

○多重反射波

波数	0	1	5	6	7	8
音速度		5063 m/s	5000 m/s	5000 m/s	5031 m/s	5031 m/s
平均音速度		5025 m/sec				

○第1到達波音速度

1	5063 m/sec
2	3175 m/sec
3	2597 m/sec
4	2500 m/sec

表-7 ステンレス鋼 5φ 2000ℓ 丸棒導波棒での多重反射波の減衰率

## 1. 各波の波高値

波 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
+側電圧 (V)	1.15	1.1	0.7	0.85	0.55	0.5	0.37	0.23	0.15
-側電圧 (V)	1.4	0.9	0.6	0.7	0.75	0.4	0.25	0.24	0.12
P-P電圧(V)	2.55	2.0	1.3	1.55	1.3	0.9	0.62	0.47	0.27

## 2. 減 衰 率

波 数		1	→	5	→	6	→	7	→	8
減 衰 率	+ 側	- 1.6 dB/m		- 0.21dB/m		- 0.65dB/m		- 1.03dB/m		
	- 側	- 1.36dB/m		- 1.37dB/m		- 1.02dB/m		- 0.09dB/m		
	P - P	- 1.46dB/m		- 0.8 dB/m		- 0.81dB/m		- 0.6 dB/m		



表-8 アルミニウム 3φ 2000ℓ丸棒導波棒での多重反射波の時間差および音速度

1. 時間差

波 数	0	1	2	3	4
到達時間 (msec)	0	0.385	0.625	1.165	1.945
到達時間差 (msec)			0.78	0.78	

2. 音速度

◦多重反射波

波 数	0	1	3	4
音速度		5195m/s	5128 m/s	5128m/s
平均音速度		5150m/sec		

◦第1到達波音速度	5195 m/sec
2 "	3200 m/sec

表-9 アルミニウム 3φ 2000ℓ丸棒導波棒での多重反射波の減衰率

1. 各波の波高値

波 数	1	2	3	4
+側電圧 (V)	3	2.6	0.55	0.25
-側電圧 (V)	2.5	2.2	0.8	0.2
P-P電圧 (V)	5.5	4.8	1.35	0.45

2. 減衰率

波 数	1	3	4
減衰率	+側	-3.68 dB/m	-1.71 dB/m
	-側	-2.47 dB/m	-3.01 dB/m
	P-P	-3.05 dB/m	-2.39 dB/m

表-10 アルミニウム 5φ 2000ℓ 丸棒導波棒での多重反射波の時間差および音速度

1. 時間差

波数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
到達時間 (msec)	0	0.38	0.5	0.6	0.63	0.75	1.16	1.945	2.11	2.725	2.795	3.5
到達時間差 (msec)		0.78		0.785		0.78		0.775				

2. 音速度

○多重反射波

波数	0	1	6	7	9	11
音速度	5263 m/s	5128 m/s	5096 m/s	5128 m/s	5161 m/s	

平均音速度 5155 m/sec

○第1到達波音速度	5263 m/sec
2 "	4000 m/sec
3 "	3333 m/sec
4 "	3175 m/sec
5 "	2667 m/sec

表-11 アルミニウム 5φ 2000ℓ 丸棒導波棒での多重反射波の減衰率

## 1. 各波の波高値

波 数	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11
+側電圧 (V)	2.85				1.2	0.6	0.45	0.3		0.2
-側電圧 (V)	1.9				1	0.5	0.3	0.25		0.2
P-P電圧(V)	4.75				2.2	1.1	0.75	0.55		0.4

## 2. 減衰率

波 数		1	→	6	→	7	→	9	→	11
減衰率	+側	-1.88dB/m		-1.51dB/m		-1.51dB/m		-0.88dB/m		
	-側	-1.39dB/m		-1.51dB/m		-1.51dB/m		-0.48dB/m		
	P-P	-1.67dB/m		-1.51dB/m		-1.51dB/m		-0.69dB/m		

表-12 ステンレス鋼製 6.3φ 0.35t 2000ℓパイプ導波棒での音速度

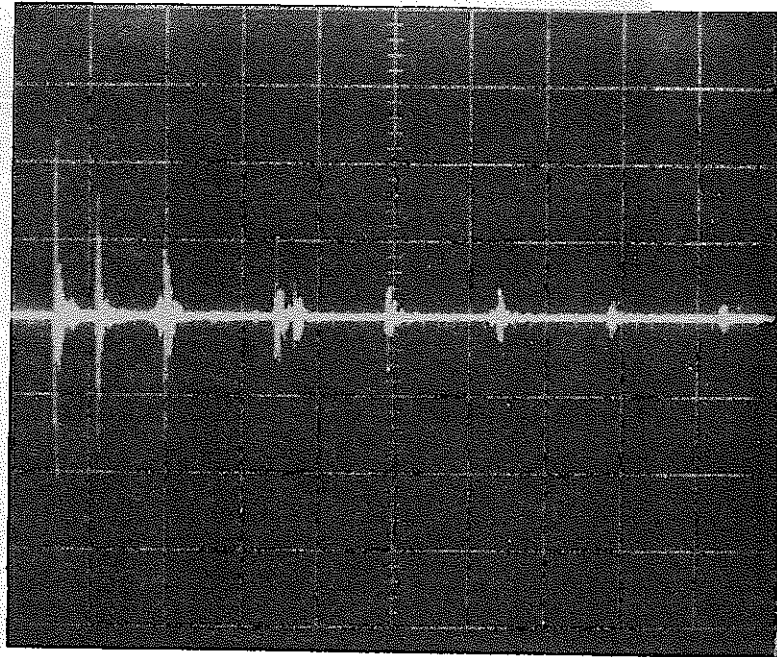
1. 時間差

波数	0	1	2	3	4	5	6	7	8
到達時間 (msec)	0	0.385	0.41	1.09 (P)	1.2 (P)	1.315 (P)	1.45 (P)	1.495 (P)	1.54 (P)
				1.0	1.12				

2. 音速度

第1到達波音速度	5195 m/sec	
2 "	4878 m/sec	
3 "	1835 m/sec (ピーク点)	2000 m/sec (立上り点)
4 "	1667 m/sec ( " )	1786 m/sec ( " )
5 "	1521 m/sec ( " )	
6 "	1379 m/sec ( " )	
7 "	1338 m/sec ( " )	
8 "	1299 m/sec ( " )	

写真-1

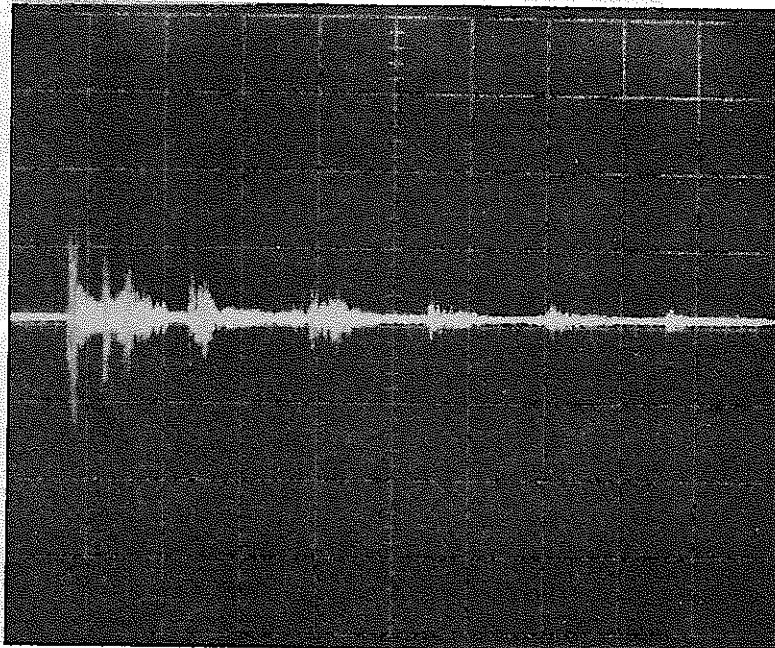


ステンレス鋼丸棒 3 $\phi$  2000  $\ell$

0.5 msec/cm

1 v/cm

写真-2

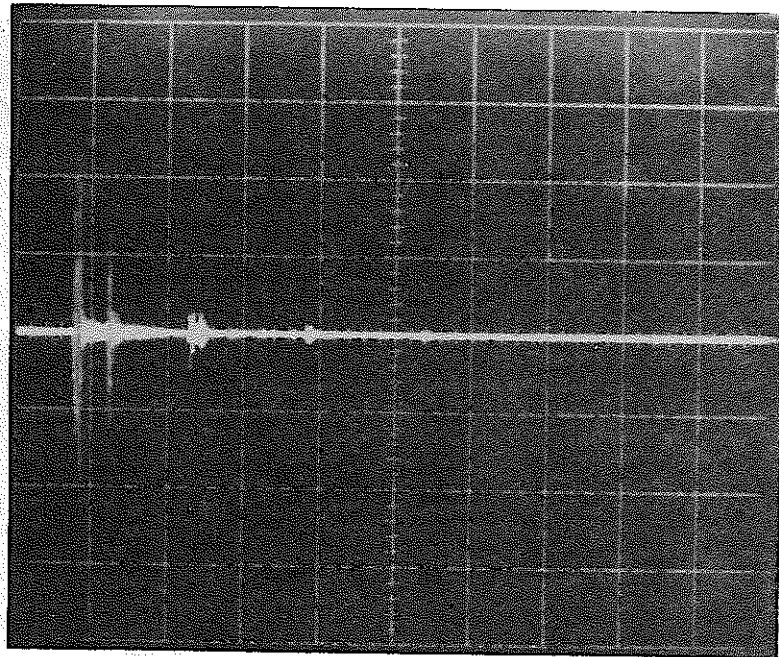


ステンレス鋼丸棒 5 $\phi$  2000  $\ell$

0.5 msec/cm

1 v/cm

写真-3

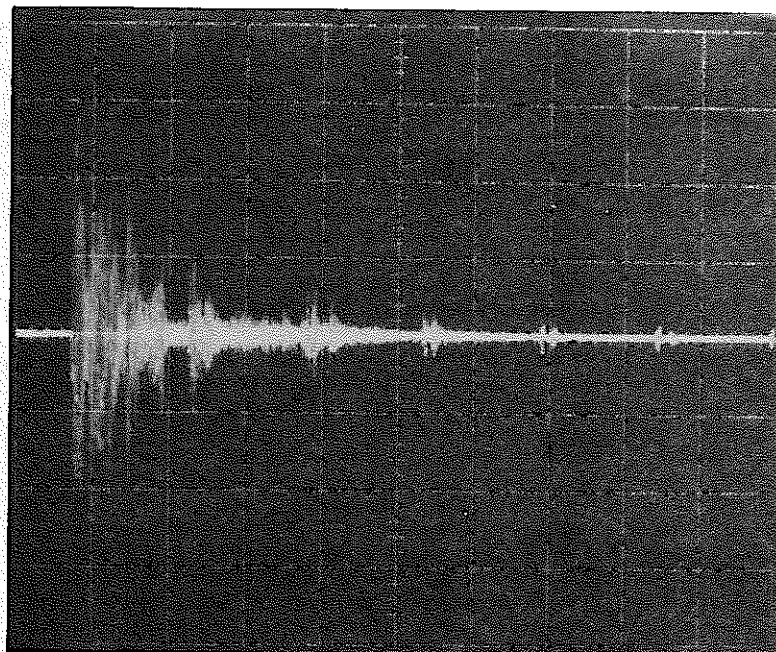


アルミニウム 3 $\phi$  2000ℓ

0.5 msec/cm

1 v/cm

写真-4

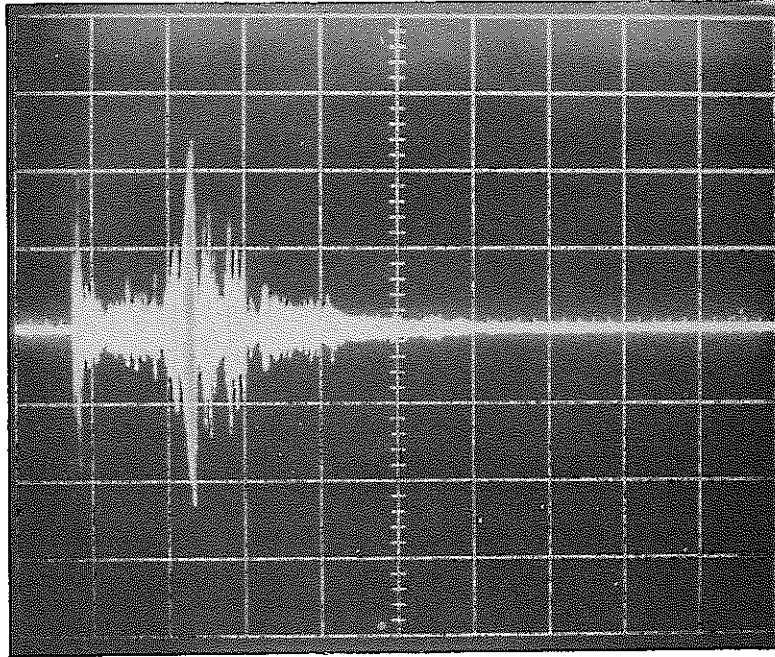


アルミニウム 5 $\phi$  2000ℓ

0.5 msec/cm

1 v/cm

写真-5

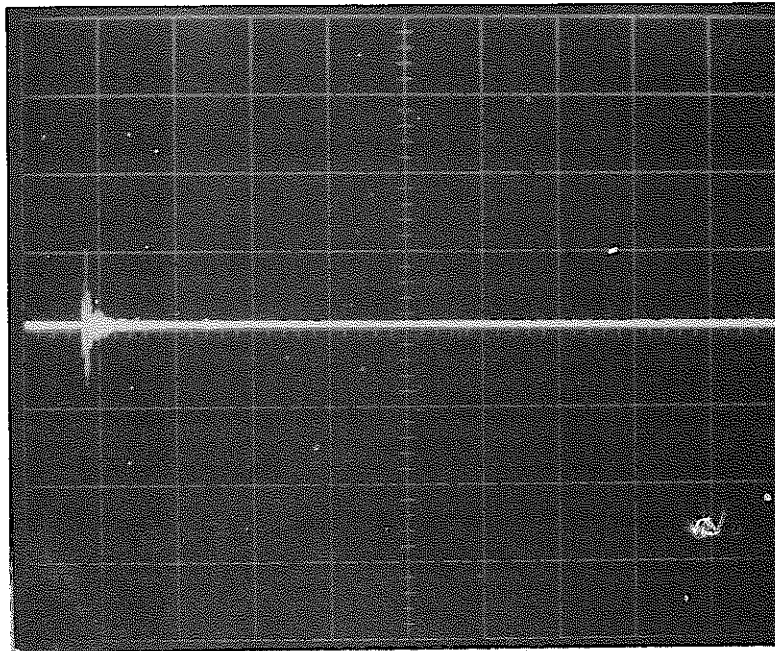


ステンレス鋼製パイプ 6.3 $\phi$  0.35 t 2000 $\ell$

0.5 msec/cm

1 v/cm

写真-6



ステンレス鋼製パイプ (以下同上)

受信センサより 10 cm 前に巾 5 cm のガムテープを 2 所にはりつけた。

## 4. 考 察

### 4-1 減衰について

#### 4-1-1 減衰率

多重反射波の波高値より求めた減衰の度合は、P-P電圧で計算すると、いずれも最大で-3 dB/m以下の値を示し、アルミニウムよりもステンレス鋼の方が減衰が小さい傾向にある。従前からの結果ではアルミニウムの方が超音波の減衰が少ないことが示されており、逆の傾向になるものと考えられていた。今回の試験では多重反射波を利用して減衰率を測定したため、送受のトランスデューサーの組み合わせは同じではない。しかし、ステンレス鋼丸棒(3 mm $\phi$ )とアルミニウム丸棒(5 mm $\phi$ )は同じトランスデューサーの組み合わせで測定を行われていた。この時のパルサー電圧と受信波の第1到達波との関係を見ると、アルミニウム丸棒(5 mm $\phi$ )はステンレス鋼丸棒(3 mm $\phi$ )の半分のパルサー電圧でステンレス鋼丸棒(3 mm $\phi$ )より高い受信電圧を得ている。他の導波棒でも同じようなことが言えるので、やはりアルミニウムの方がステンレス鋼より減衰は小さいと考えられた。

このように逆になった理由として考えられるのは、①送受のトランスデューサーの組み合わせが異なっている。②トランスデューサーの取り付け状態の差。③導波棒両端面の仕上げ状態。などの測定上の問題や、根本的な問題として、④減衰率が零や正になった所もあるなど多重反射波形のみだれがある。⑤導波棒とトランスデューサーとの反射損失を補正していない。といった事がある。

この中で①~③は減衰率が大きく出ることとはあっても小さくなることはあり得ないので考慮しないこととし、④も補正そのものが出来ないので、⑤の反射損失のみを考慮する。

反射損失は、試料(導波棒)がステンレス鋼の場合1.2 dB/回、アルミニウムでは3.3 dB/回(次の4-1-2を参照)である。このようにアルミニウムの方がステンレス鋼の3倍近くも大きい。この反射損失を補正しなかったためにアルミニウムの方が減衰が大きくなった事も考えられる。音波が導波棒内を一往復すると、トランスデューサーとの反射損失は2回はいることを考慮に入れて補正を行った結果、ステンレス鋼丸棒(3 mm $\phi$ )で-0.5 dB/m以下、ステンレス鋼丸棒(5 mm $\phi$ )では-0.9 dB/m以下、アルミニウム丸棒(3 mm $\phi$ )は-1.4 dB/m以下であり、アルミニウム丸棒(5 mm $\phi$ )では0.02 dB/mとほぼ0に近い値となった。

このように、やはりアルミニウムの方が減衰は大きいという傾向は変わらないが、減衰率は大きくても1~1.5 dB/m以内であるので、減衰そのものは小さいと言える。



4-1-2 反射損失

音響インピーダンスの異なる物質の境界面（平面）に垂直に平面波が入射した場合、境界面で反射し同じ経路を帰っていくものと通過していく波とに分かれる。この両者の割合は音響インピーダンスによって理論的に計算でき、それぞれ音圧反射率、通過率という。図-2のように音響インピーダンスが  $Z_1$ 、 $Z_2$  という2つの物質の境界面で  $Z_1$  の方が  $P_0$  という音圧の波が来て境界面で反射し、 $P_r$  の音圧の波が戻っていき、 $P_t$  の音圧が通過するものとすれば、音圧反射率 ( $R_p$ )・通過率 ( $T_p$ ) は下式で計算できる。

$$\text{音圧反射率}^{(2)} \quad R_p = \frac{P_r}{P_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

$$\text{音圧通過率}^{(2)} \quad T_p = \frac{P_t}{P_0} = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

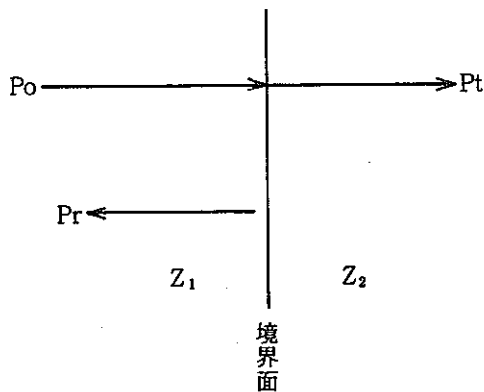


図-2 音 圧 反 射 率

図-3 にトランスデューサーの構造を示す。一般的に振動子をダンパーで包みトランスデューサー内での不要な反射や、振動子の共振を押えている。また振動子を保護するために振動子の前面にベークライトとかエポキシ樹脂などの保護板がついている。このようなトランスデューサーを試料にとりつけた場合、試料との境界面で  $R_p$ 、 $T_p$  による反射や通過が起る。今回の場合、試料はステンレス鋼およびアルミニウムとし、トランスデューサー保護板の材質をエポキシ樹脂であるとすれば、 $R_p$ 、 $T_p$  は次のようになる。

- ◆音響インピーダンス
  - $^{(2)}$  ステンレス鋼 ;  $4.55 \times 10^6$
  - $^{(2)}$  アルミニウム ;  $1.71 \times 10^6$
  - $^{(2)}$  エポキシ樹脂 ;  $0.32 \times 10^6$

◆音圧反射率

ステンレス鋼  $R_p = \frac{0.32 - 4.55}{4.55 + 0.32} = -0.87$  87%

アルミニウム  $R_p = \frac{0.32 - 1.71}{1.71 + 0.32} = -0.68$  68%

◆音圧通過率

ステンレス鋼  $T_p = \frac{2 \times 0.32}{4.55 + 0.32} = 0.13$  13%

アルミニウム  $T_p = \frac{2 \times 0.32}{1.71 + 0.32} = 0.32$  32%

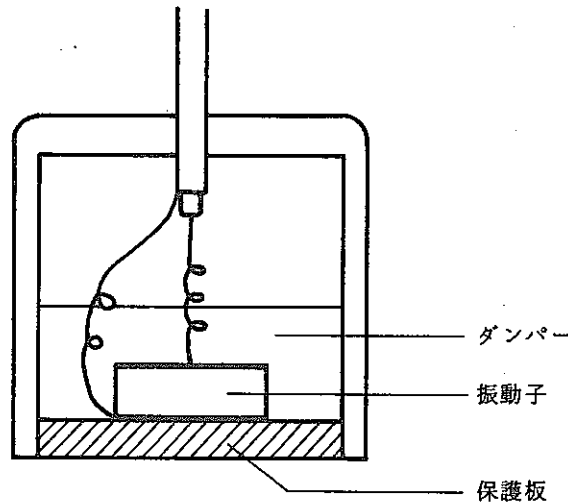


図-3 トランスデューサーの構造

またトランスデューサーに入った音波は中のダンパーで減衰してしまい再び試料内に入射しないものと仮定し、最初の試料からの入射音圧を 100 として考えると図-4 に示すようになる。図では多重反射波がトランスデューサーと試料との境界面で反射するものと、トランスデューサー内に入っていきものの割合を3次の反射まで示している。また反射側にも送信用のトランスデューサーが取り付けがあるので、そこから反射して帰ってくる音波の音圧は音圧反射率の割合に応じて減少している。

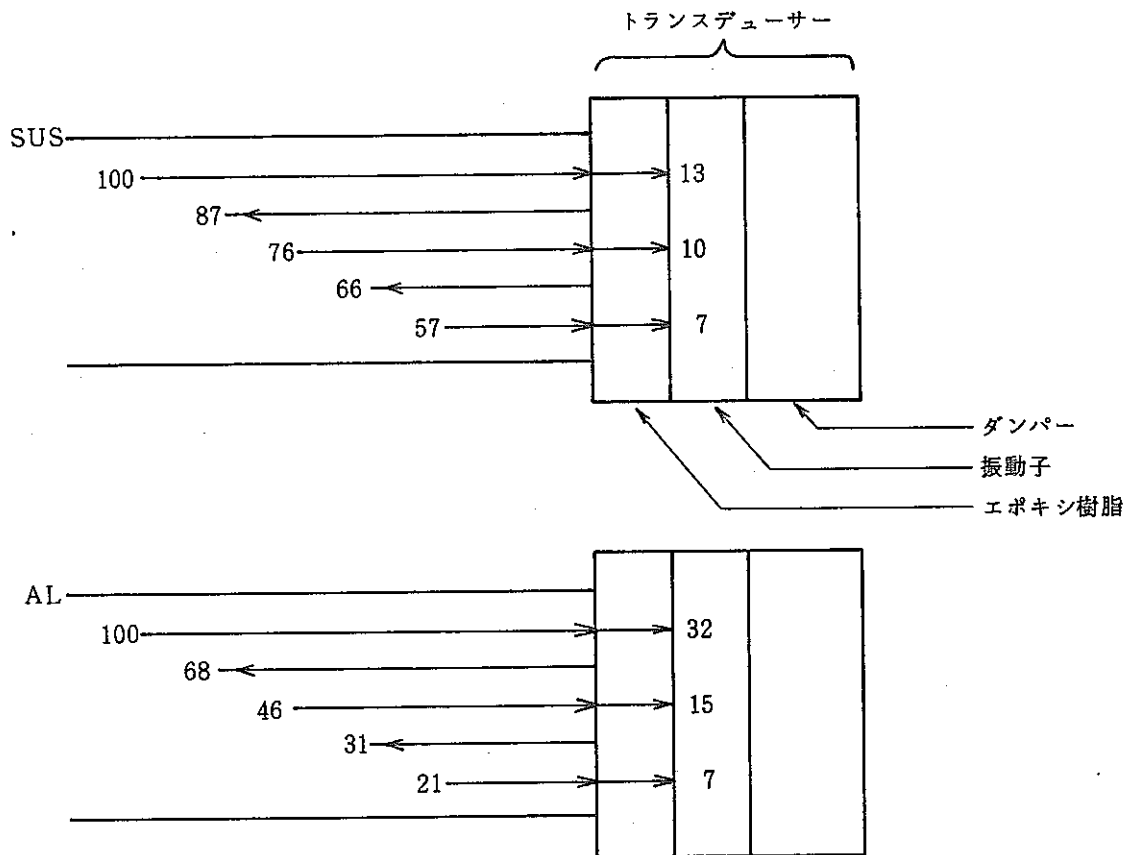


図-4 トランスデューサーでの反射損失

100 の音圧の音波が境界面で反射し、100 の音圧で戻っていくならば反射損失は0であるが、ステンレス鋼で87、アルミニウムだと68の音圧しか戻っていない。反射損失  $R_s$  は下式により計算される。

◆ (2) 反射損失  $R_s = 20 \log \frac{P_r}{P_o}$  (dB)

SUS 304  $R_s = 20 \log 0.87 = -1.2$       1.2 dB/回

Al  $R_s = 20 \log 0.68 = -3.3$       3.3 dB/回

多重反射の1回当たり、ステンレス鋼で1.2 dB、アルミニウムは3.3 dBの反射損失があることになる。ただしこれは平面波の場合であり、今回のような細い棒中の波でそのまま当てはまるかどうかは定かでないが、一応この値を反射損失とした。

#### 4-1-3 音圧反射率と検出感度

アルミニウムはステンレス鋼に比べ  $1/2 \sim 1/3$  程度のパルサー電圧で同じ検出信号レベル

が得られるが、これは図-3よりアルミニウムの場合には音圧反射率が68%と低いため、32%の音圧はトランスデューサーの中へ入っていく。しかし、ステンレス鋼の場合には音圧反射率が87%と高いため、トランスデューサー内に入っていくのは入射音圧の13%でしかない。これはアルミニウムの場合の約40%である。そこで同じ検出電圧を得ようとするならば、入射音圧つまりパルサー電圧を2倍以上にしなければならないということになる。

#### 4-2 音速度について

ステンレス鋼(3mmφ)導波棒を除いて他はだいたい同じ音速度であり、第1到達波とその多重反射波は音速度より縦波でないことがわかった。これは棒の中を伝わる音波は板波の一種であり、一般の無限大媒体中での縦波音速度とは異っており、その音速度は理論的に下式で表わされる。

$$\text{棒中の縦波音速度}^{(2)} \quad C_b = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ただし、E : ヤング率 (dyne/cm<sup>2</sup>)

ρ : 密度 (g/cm<sup>3</sup>)

この式を用いてステンレス鋼およびアルミニウムの音速度を計算すると次のようになる。

A) ステンレス鋼 (ヤング率<sup>(3)</sup>; 19700 kg/mm<sup>2</sup>, 密度; 8.03 g/cm<sup>3</sup>)

$$C_b = 4903 \text{ m/sec}$$

B) アルミニウム (ヤング率<sup>(2)</sup>;  $7.05 \times 10^{11}$  dyne/cm<sup>2</sup>, 密度; 2.67 g/cm<sup>3</sup>)

$$C_b = 5139 \text{ m/sec}$$

無限大媒体中の縦波音速度と比べてステンレス鋼の場合 757 m/sec, アルミニウムは 1121 m/sec も遅い値となる。測定値との差はステンレス鋼丸棒(5mmφ)で122 m/sec, アルミニウム丸棒(3mmφ)11 m/sec, アルミニウム丸棒(5mmφ)では16 m/secであり、いずれも測定値の方が速い値となっている。ステンレス鋼では少し差があるが、アルミニウムの場合はほとんど同じ値となりモードの不明だった多重反射波は「棒中の縦波」であると考えられた。

またステンレス鋼とアルミニウムの縦波音速度は600 m/secも差があるのに対し、この「棒中の縦波」では236 m/secの差となり、かなり接近してくる。これは代表的な理論計算値であり、実際は材質などの差により計算値とは違ってくるものと思われる。したがって測定の結果、ステンレス鋼丸棒(5mmφ)とアルミニウム丸棒の音速度差が130 m/sec程度になってしまうのも不思議ではない。たとえばアルミニウムの場合、別の資料によれば、<sup>(2)</sup> ヤング率  $6.85 \times 10^{11}$  dyne/cm<sup>2</sup>, 密度 2.7 g/cm<sup>3</sup> であり、この場合の  $C_b$  は 5037 m/sec となる。すると理論値でのステンレス鋼との差は134 m/secとなる。ただし、この場合測定値との差は16 m/secから118 m/secへと大きくなる。さらにステンレス鋼についても表-13の固体弾性定数の

数値を用いて  $C_b$  を計算すると  $4996 \text{ m/sec}$  という値になる。これだと理論値上の差は  $41 \text{ m/sec}$  までに小さくなり、また測定値との差も  $29 \text{ m/sec}$  とほとんど理論値と一致するようになる。

ステンレス鋼丸棒 ( $3 \text{ mm}\phi$ ) も理論上は他の導波棒と同じ「板波=棒中の縦波」のはずであるが、ステンレス鋼丸棒 ( $5 \text{ mm}\phi$ ) と比べて  $398 \text{ m/sec}$  も差があり、計算で求めた「棒中の縦波」音速度よりも  $520 \text{ m/sec}$  も速く縦波に近い音速度であるが、加工法などの差により音速度もかなり異なってくるので、どちらとも断定できない。

ステンレス鋼、アルミニウムの横波・表面波の音速度は次に示すとおりである。

- ① ステンレス鋼       $3120 \text{ m/sec}$  (横波) ;  $2887 \text{ m/sec}$  (表面波)
- ② アルミニウム       $3080 \text{ m/sec}$  (横波) ;  $2880 \text{ m/sec}$  (表面波)

このように、横波と表面波との差は  $200 \text{ m/sec}$  程であり、先に横波とした測定値も横波か表面波かの判断はつけづらい。しかし、測定値が横波音速度に近いので横波と判定した。

ステンレス鋼、アルミニウムとも  $5 \text{ mm}\phi$  の棒は  $3 \text{ mm}\phi$  棒に比べて「棒中の縦波」および「横波」以外の波が見られた。これらの波は第1到達波(「棒中の縦波」)の後にそのリングングのような形で続いている波である。この波は次のように考えられる。

棒の中を伝わる音波は広い意味で板波と言える。板波はまず、連続波と A. E. 波のようなパルス波とでは音速度が異なる。<sup>(2)</sup> 図-9 にアルミニウム板でのパルス波での板波音速度の例を示す。この図から明らかなように板波の音速度は、周波数および板厚によって大きく変化する。この図は板の場合であり丸棒とは違うが、傾向的には似通っていると思われる。A. E. 波は、その信号の周波数帯域がかなり広く数十 KHz ~ 数 MHz 程あると言われている。このことは、板波の音速度を決定する因子の一つである周波数が同時に多数発生したことと同じであり、音速度の異なった波が同時に発生するものと考えられる。また、図-9 から明らかなように板厚の厚いものほど同じ周波数帯でも多数の音速度の異なった音波が伝播しやすい。したがって、棒の場合でも直径が大きくなるほど音速度の異なった音波が伝播し、音速度差による波形の分離が現われてくるものと思われる。今回の場合  $3 \text{ mm}\phi$  では、それほど明瞭でないが、 $5 \text{ mm}\phi$  では顕著に表われていた。

また、 $5 \text{ mm}\phi$  棒は  $3 \text{ mm}\phi$  棒に比べて波のリングングと考えられる部分がきわめて長かったが、この原因としては、①棒内での音波の複雑な反射により波の幅が広がった。②板波(棒中の)の速度分散により波の幅が広がった。(これは、伝播距離が短かくて波形の分離までしなかったものや、音圧が小さく前の波との区別ができなかったものなどによる)のいずれかであろうと考えられる。

## 4-3 管と板との比較

管の場合は棒とはまた違う伝播をするものと思われる。第1到達波の音速度はステンレス鋼丸棒(5 mmφ)より170 m/sec速い値であるが、この程度の差であれば、材質の差などから考えて同一モードの伝播であると見なせる。管を伝わる波もまた板波の一種である。しかし、管を全く同じではないが、薄い板として考えるならば「板に沿った縦波」として次式で音速度が求められる。

$$^{(2)} \text{板中の縦波音速度} \quad C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}}$$

これより音速度5204 m/secが得られる。(ただし、この場合ステンレス鋼の縦波；横波音速度より、固体弾性定数を算出し(表-13)使用した。またヤング率を<sup>(3)</sup>19700 kg/mm<sup>2</sup>として計算すると、音速度は5108 m/secとなる。)測定値は5195 m/secであり、「棒中の縦波」より「板中の縦波」の音速度に近い。

このことを確認するため管と同一材質で同じ厚さの板で試験すれば一番理想的であるが、それができないので、管を軸方向にたて割りにして板を模擬して使用し、音速度を比べてみた。ただしこの時、管の長さは管をたて割りにする都合上1mのものを使用した。その結果を写真7.8および表-14, 15に示す。

表-13 ステンレス鋼の固体弾性定数

ステンレス鋼の「たて波」, 「よこ波」音速より下式を使って各定数が求められる。

1) 剛性率  $\mu = C_s^2 \rho$

2) 体積弾性率  $K = C_D^2 \rho - \frac{4}{3} \mu$

3) ヤング率  $E = \frac{9 K \mu}{3 K + \mu}$

4) ポアソン比  $\sigma = \frac{3 K - 2 \mu}{2 (3 K + \mu)}$

ただし  $C_s$  : よこ波速度

$C_D$  : たて "

ステンレス鋼のたて波速度 5660 m/s

ステンレス鋼のよこ波速度 3120 m/s

ステンレス鋼の密度 8.03 g/cm<sup>3</sup>

以上より

$$\mu = 7.82 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$$

$$K = 15.29 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$$

$$E = 20.04 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$$

$$\sigma = 0.28$$

まず第1到達波の音速度は「切開してない管（以下管と略す）」では5128 m/sec, 「軸方向にたて割りにした管（以下板と略す）」は5000 m/secといずれも2mの管の音速度5195 m/secよりも遅くなっている。その差は管では67 m/secであるが、板では195 m/secも遅くなっている。

板の音速度はステンレス鋼丸棒5 mmφよりもわずかに遅い値で、計算により求めた「板中の縦波」音速度5204 m/secよりも「棒中の縦波」音速度4903 m/secに近い値となった。これは、板を模擬したつもりでも、実際は違ったモードで音波が伝播しているということを示している。

2mの管の時に見られた音速度が2000 m/sec以下の波の群は1mの管および板の両方に見られる。この最初の波の音速は、第1到達波とは逆に板の方が速くなっており、この音速度は2151 m/secである。これに対し管では2020 m/secであり131 m/sec遅くなっている。また2mの管と比べると、2mの管の時は約2000 m/secであったので1mの管とほぼ同じ値である。

この部分の波群は板波の速度分散による波形分離で観測されるものと考えられる。ここに管と板とで音速度に差が出るということは、伝播モードが異なっているということを示している。同じ伝播モードでも周波数の変化があれば音速度が変わることがあるが、この場合同一の組み合わせのトランスデューサーを使用しているので周波数の変動があるとは考えにくい。

2mの管と1mの管の波形を比べてみると、2mの管は後群の波が多数分離して表われていたが、1mの管は2mの管ほど波の分離はみとめられなかった。これは2mの管は伝播距離が長いことによる速度分散による波形分離が1mの管より多く表われたためと考えられる。しかし、波の持続時間はあまり差がない。板になると管に比べ半分以下の0.3 msec程しかない。

そこで波の各部の周波数を調べた。その結果まず1mの管の場合、図-5に示すように、3つの代表的な部分について周波数解析を行った。その結果を図-6に示す。第1到達波（図-5のA部分）は140 KHzと490 KHzにピークを持ち、帯域はそれぞれ70 KHz, 150 KHz程の2つの周波数成分の異なる波で構成されている。これはデジタルメモリに記録した波形図からも明らかのように、最初に周波数の高い波が22 μsecほどあり、次に低い周波数の波が30 μsecほど続き、あとはリングングのような周波数の高い波があるといったようにハッキリと分かれている。板波による波形分離の部分（図-5のB, C）は波形図ではBの部分の方が周波数

が高そうに見える。測定してみてもピークはBの部分が500 KHz, Cの部分は430 KHzと70 KHz程Bの部分の周波数は高い。周波数帯域は両者とも約100 KHzあり, パワースペクトラムの形もほとんど同じである。

これに対し板では波形全体は大きく4つの部分に分けられる。(図-7参照)まず区間A, つまり第1到達波は周波数130・210・450・510・580 KHz附近にピークがあり周波数の帯域が広い。(図-8参照)また周波数の低い方がエネルギーが強い。波形図から明らかなように, 管の場合とは逆に周波数の低い部分が先に到着し, その後これに乗ったような形で周波数の高い波が来ている。次に示すのは区間C, Dであるが, ここは570 KHzに最大のピークがある。また420 KHzにも小さなピークがある。帯域幅は広く約200 KHzにもおよんでいる。C, Dの主要な部分は同じであるがDの方が少し後の波まで含んでいる。この差はCでは見られなかった510 KHzにもピークが見られること, および高域での特性は同じであるが, 低域に約30 KHzほど帯域が伸びていることで表われていた。これらのことから, 次に位置する波の周波数は低いことがうかがえる。

Eの区間は帯域幅約100 KHzでピークは480 KHzにあり, A, CおよびDに比べて約100 KHz中心周波数が低くなっている。最後のFの部分は帯域幅約100 KHz, ピークは440 KHzでEに比べ40 KHz, A, Cに比べると140 KHzも中心周波数は低い。

以上の結果より次のことが考えられた。

- ① 第1到達波には100~200 KHzの低い周波数成分が含まれており, これ以降の波にはこの低い周波数成分は見られない。これは, 薄肉管であるので周波数が低くすぎると板波の速度分散が発生するような条件にならないためと考えられる。
- ② 第1到達波の高域の部分と後群の最初の波の周波数成分はほとんど同じである。それ以降の波は, 波の到達時間が遅くなるほど周波数は低くなる傾向にある。このことは, 板波が発生していれば周波数が下るほど音速度が遅くなる部分のモードの波ということを示している。ステンレス鋼とは異なるが鋼材における板波の(周波数×板厚)に対する音速度のグラフ<sup>(2)</sup>(図-10)から発生する板波のモードは, (a)管肉厚が0.35 mmと薄いこと, (b)周波数が500~600 KHzと低いこと, などからA<sub>0</sub>モードとS<sub>0</sub>モードの波以外には考えられない。S<sub>0</sub>モードの波は音速度が速く第1到達波の部分に相当する。A<sub>0</sub>モードの波は音速度が遅く, 今回の周波数範囲では2000 m/sec以下であろうと思われる。また周波数が下がれば音速度も遅くなる領域であり, 後群の速度分散による波と対応する。また管と板では同一のトランスデューサーを使用したにもかかわらず, 周波数帯域が異なり50~100 KHzほど板の方が高い。したがってA<sub>0</sub>モードの波では管より板の方が音速度は速いはずである。後群の最初の波の音速度を比べると131 m/sec板の方が速い結果となっており, これらのことから, 第1到達波はS<sub>0</sub>モード, 後群の波はA<sub>0</sub>モードであると考えられた。



表-14 ステンレス鋼製パイプ(6.3φ 0.35t 1000ℓ)

軸方向切開導波棒での音速度

1. 到達時間

波 数	0	1	2	3	4
到達時間 (msec)	0	0.2	0.465	0.5	0.55

2. 音 速 度

○ 第1到達波音速度	5000 m/sec
○ 2       "	2151 m/sec
○ 3       "	2000 m/sec
○ 4       "	1818 m/sec

表-15 ステンレス鋼製パイプ(6.3φ 0.35t 1000ℓ)

導波棒での音速度

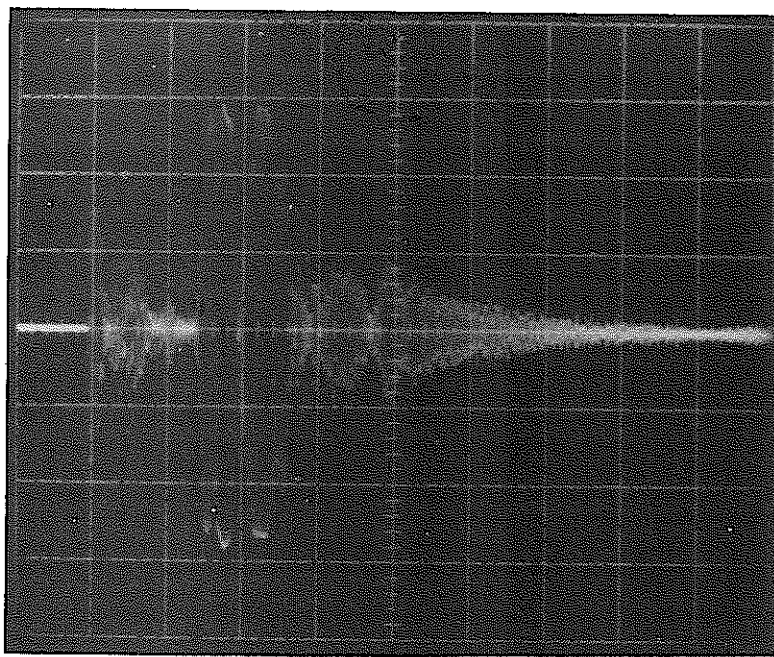
1. 到達時間

波 数	0	1	2	3	4	5	6
到達時間 (msec)	0	0.195	0.495	0.55	0.605	0.705	0.79

2. 音 速 度

○ 第1到達波音速度	5128 m/sec
○ 2       "	2020 m/sec
○ 3       "	1818 m/sec
○ 4       "	1653 m/sec
○ 5       "	1418 m/sec
○ 6       "	1266 m/sec

写真-7

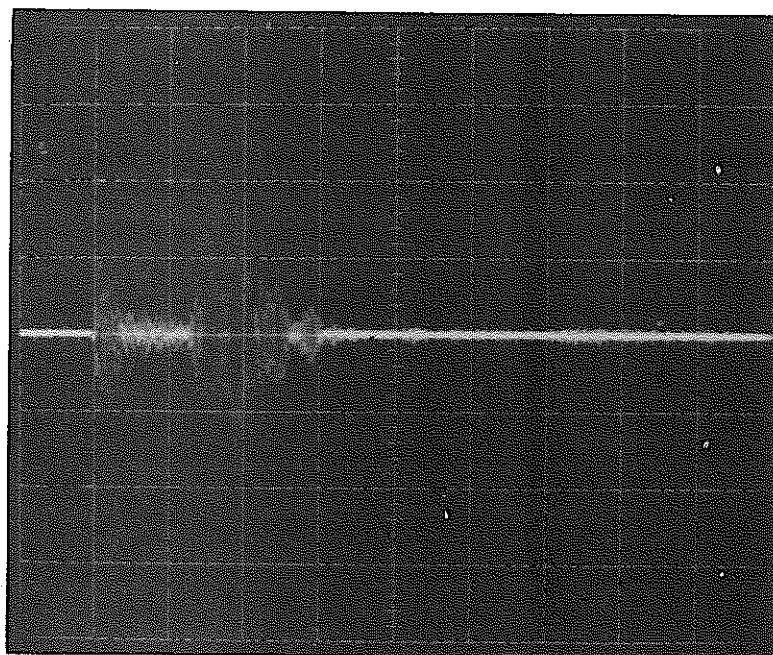


ステンレス鋼製パイプ (6.3φ 0.35t 1000ℓ)

0.2 msec/cm

1 v/cm

写真-8



軸方向切開ステンレス鋼製パイプ (6.3φ 0.35t 1000ℓ)

0.2 msec/cm

1 v/cm

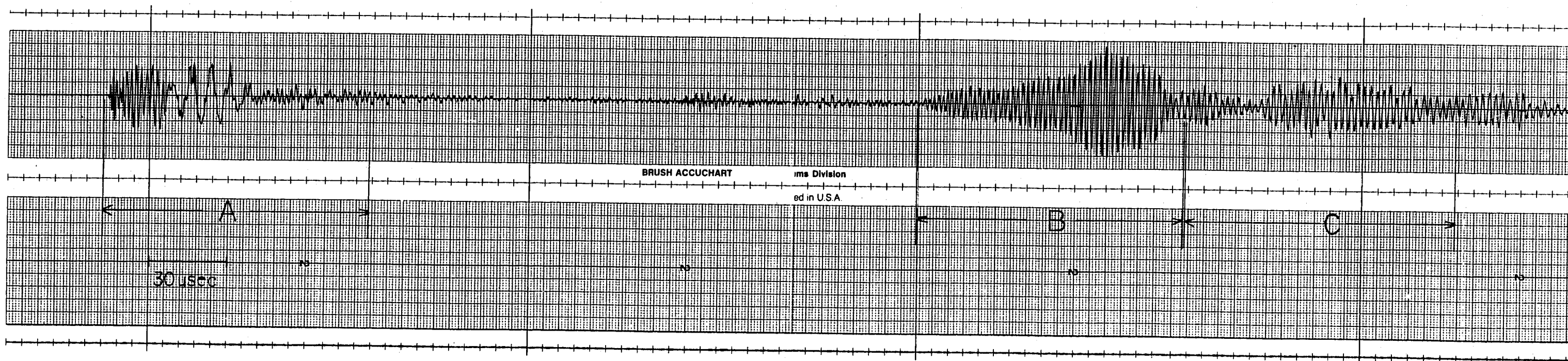


图-5 管状导波棒通过波形 (6.5  $\phi$  0.35t 1000  $l$ )

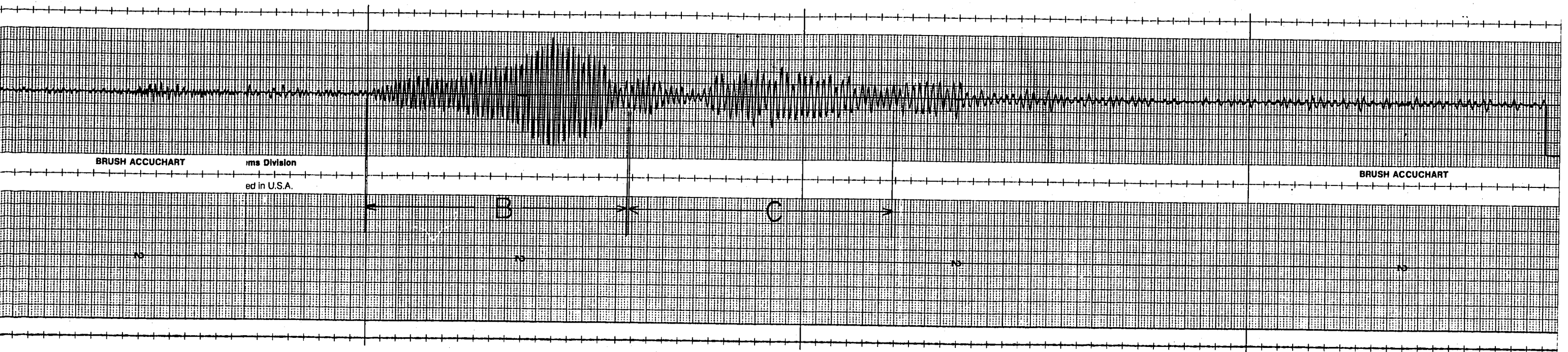


圖-5 管狀導波棒通過波形 (6.5  $\phi$  0.35t 1000  $\ell$ )

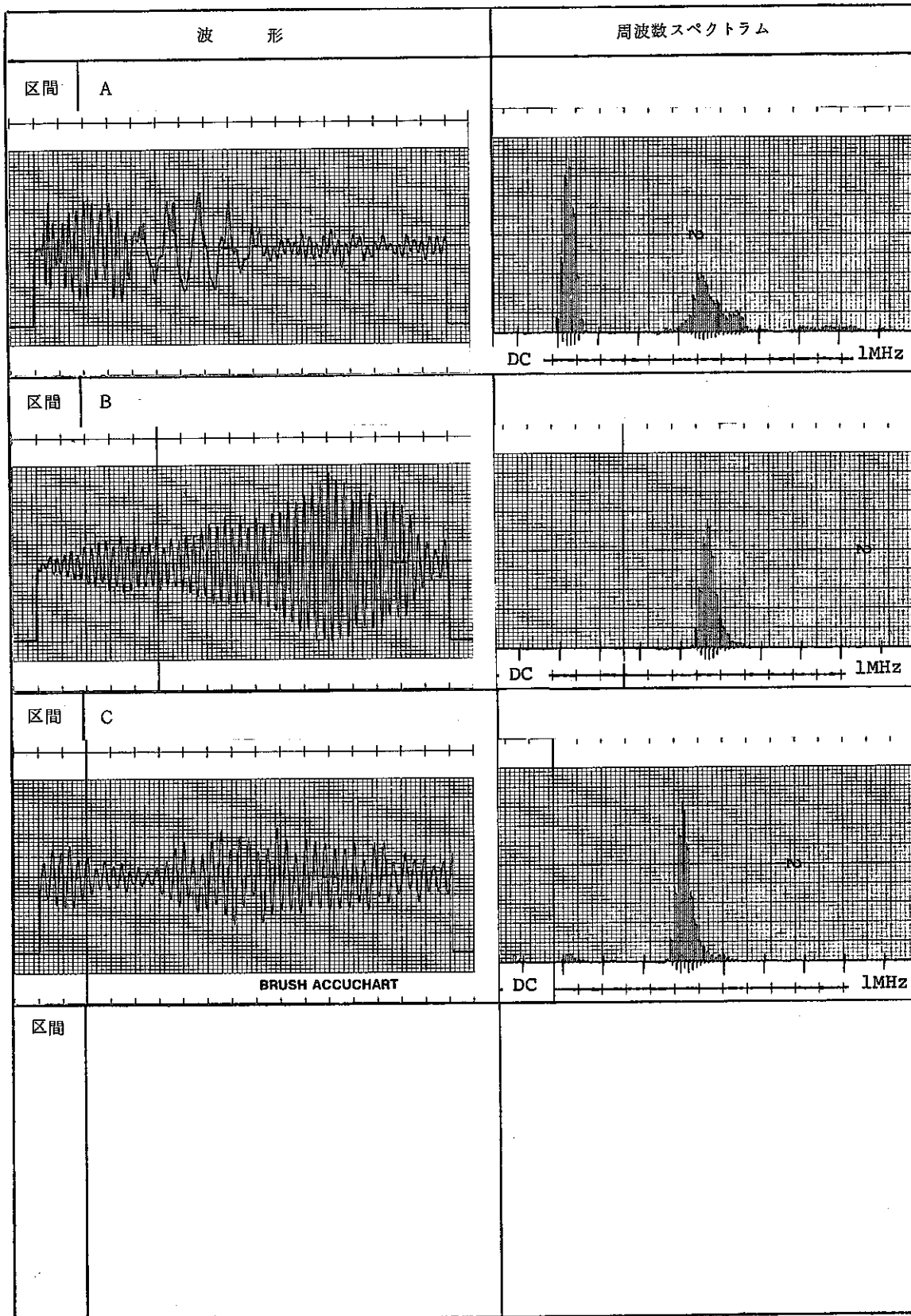


図-6 管状導波棒通過波のパワースペクトラム

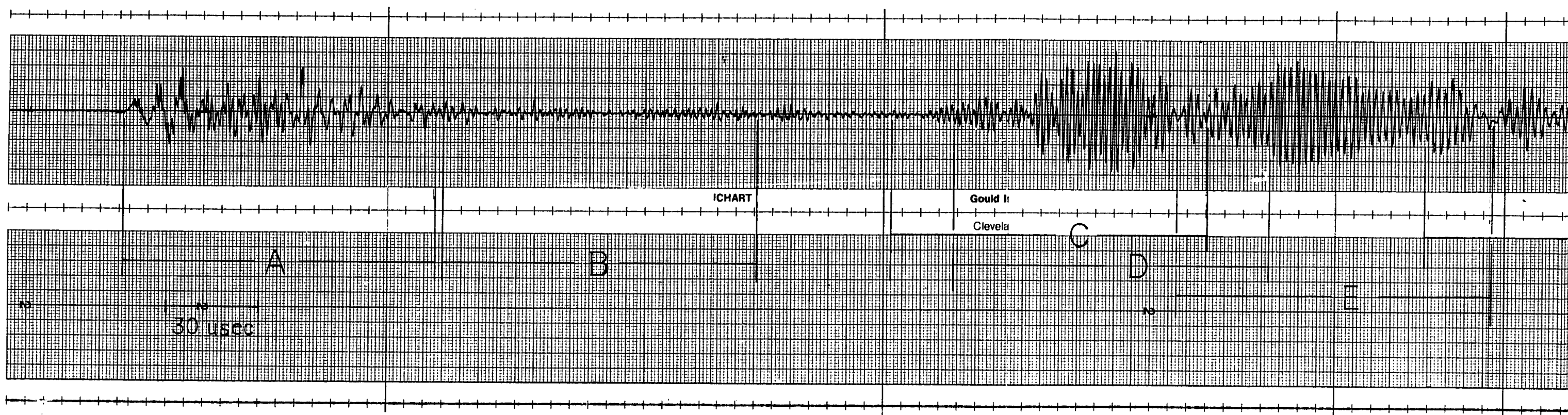


图-7 板状导波棒通过波形

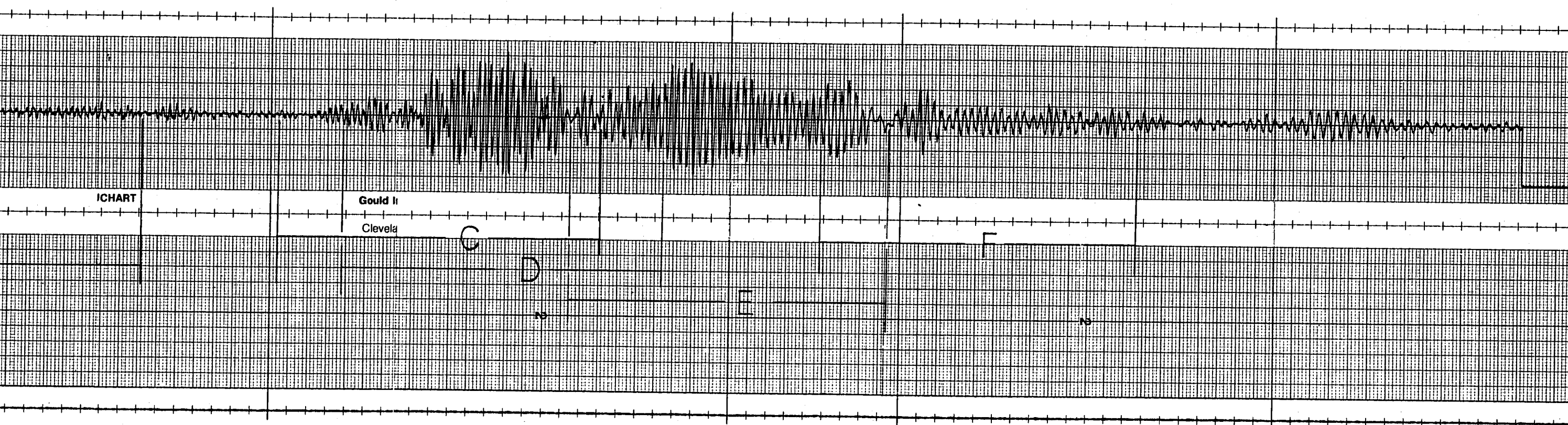


图 -7 板状导波棒通过波形

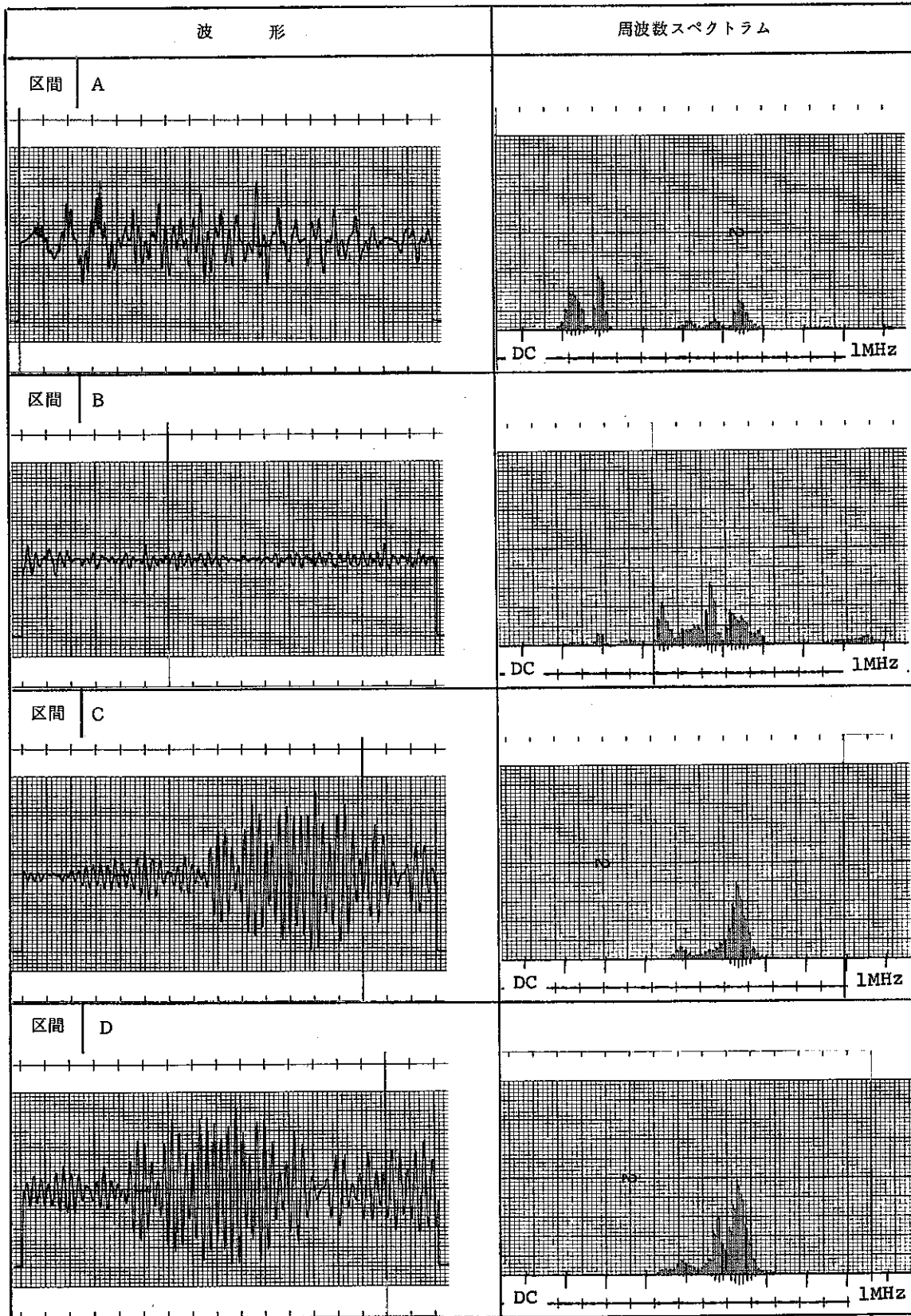


図-8-1 板状導波棒通過波のパワースペクトラム (その1)



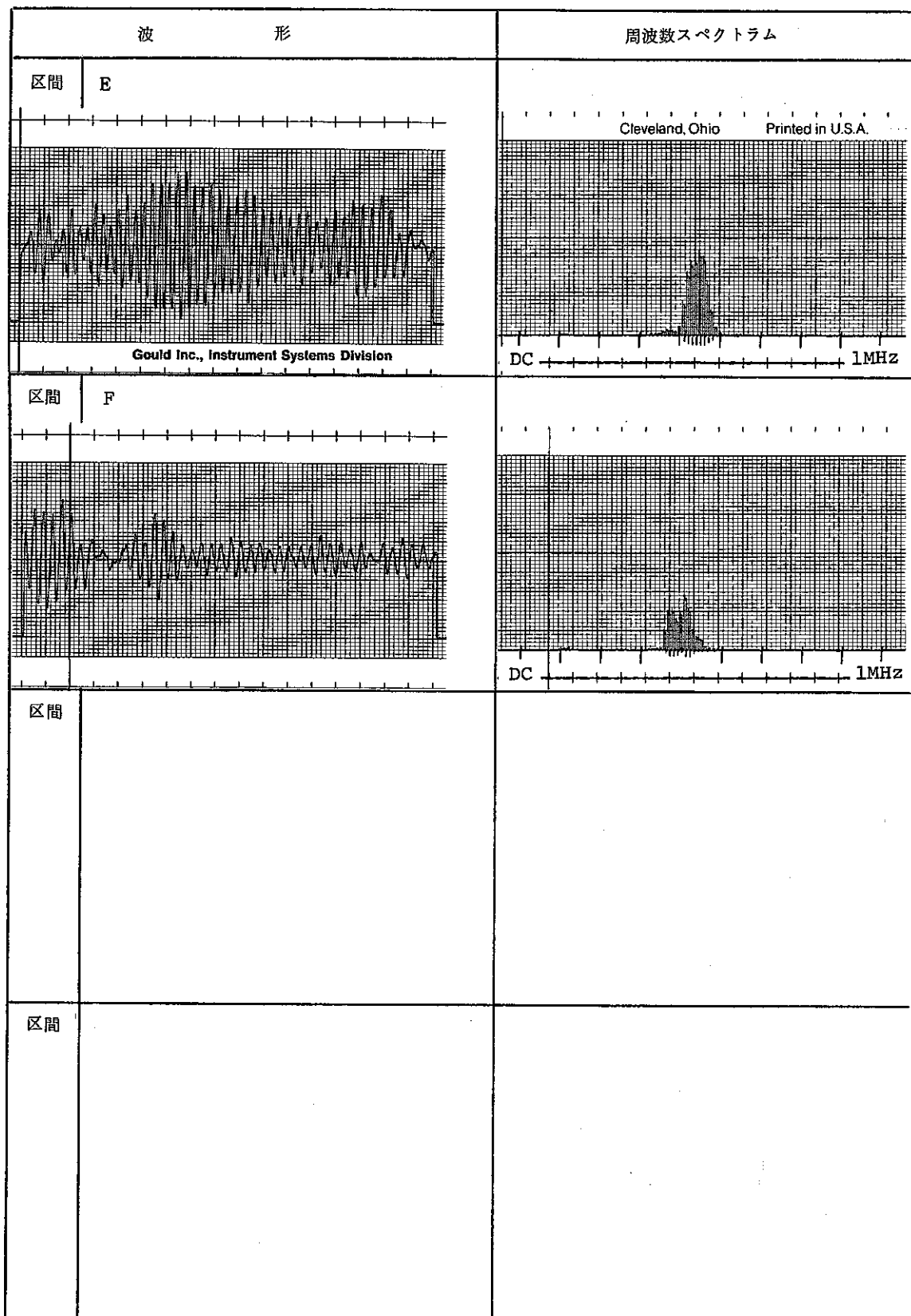


図-8-2 板状導波棒通過波のパワースペクトラム (その2)

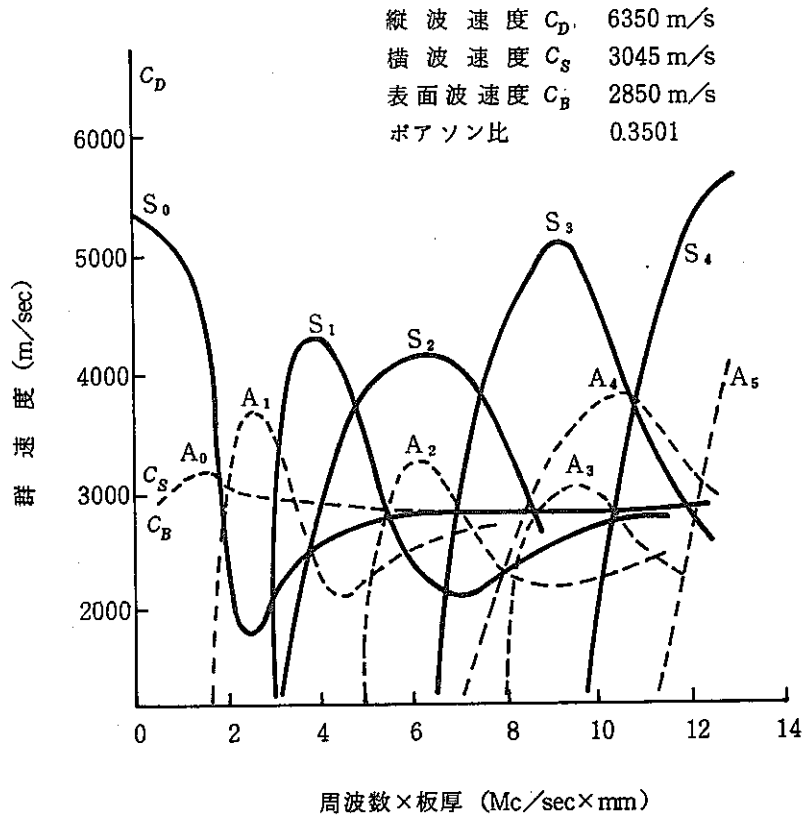


図-9 アルミニウム板の群速度

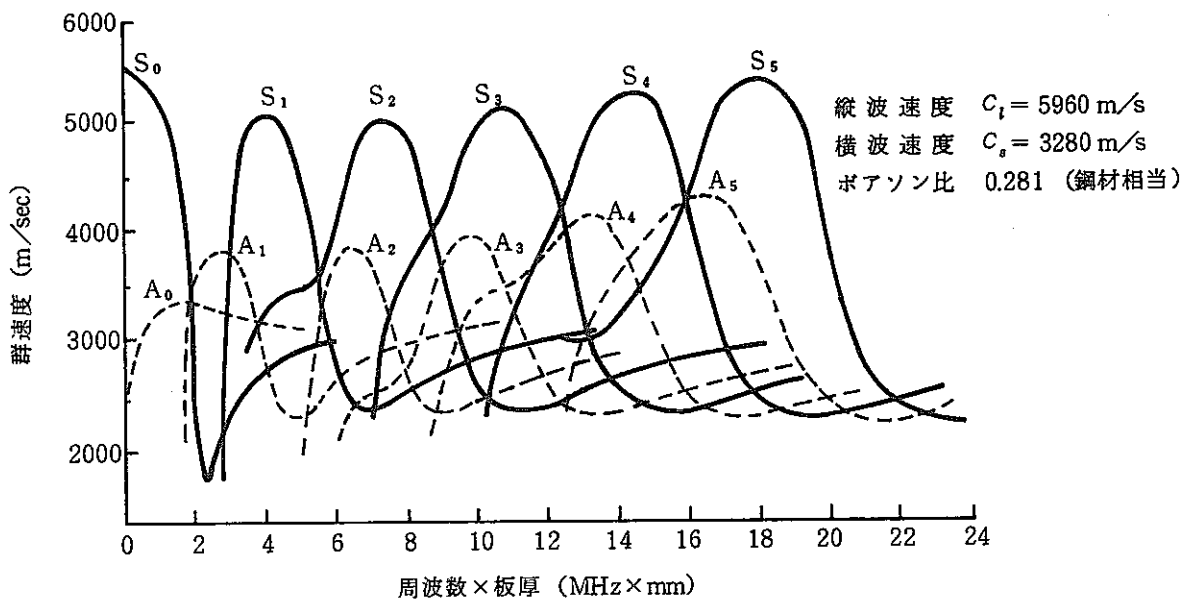


図-10 鋼板の群速度

表-16 各導波棒における音速度・減衰率

導波棒種類	音速度 (単位:m/sec)			振 幅		減 衰 率		トランスデューサー	
	第1到達波	*たて波	よこ波	第1到達波 振 幅	パルサー電圧 (V)	反射損失 補正なし	反射損失 補正あり	音源用	検出用
SUS 丸棒 3φ 2000ℓ	5479	5423	3053	4.4 VP-P	30	-1.1dB/m	-0.5dB/m	D-Z-2-1-0 592	D-Z-2-1-0 594
SUS 丸棒 5φ 2000ℓ	5063	5025	3175	2.55VP-P	35	-1.5dB/m	-0.9dB/m	D-Z-2-1-0 593	D-Z-2-1-0 595
Aℓ 丸棒 3φ 2000ℓ	5195	5150	3200	5.5 VP-P	10	-3.1dB/m	-1.4dB/m	AE-Z 1/8	D-Z-2-1-0 591
Aℓ 丸棒 5φ 2000ℓ	5263	5155	/	4.75VP-P	15	-1.7dB/m	-0.02dB/m	D-Z-2-1-0 592	D-Z-2-1-0 594
SUS パイプ 6.3φ 0.35t 2000ℓ	5195	/	/	3.6 VP-P	25	/	/	D-Z-2-1-0 592	D-Z-2-1-0 594
SUS パイプ 6.3φ 0.35t 2000ℓ	5128	/	/	4.1 VP-P	15	/	/	D-Z-2-1-0 592	D-Z-2-1-0 594
SUS パイプ (軸方向切開) 6.3φ 0.35t 2000ℓ	5000	/	/	2.7 VP-P	15	/	/	D-Z-2-1-0 592	D-Z-2-1-0 594

\* 正確には第1到達波とその多重反射波の音速度の平均値

#### 4-4 測定誤差

測定はシンクロスコープのCRT上の波形を目視で読んでいるため測定値にはかなりの誤差が含まれていると思われる。その主なものを挙げると、

- 1) シンクロスコープの時間軸の最小分割単位が大きいため、時間の読み取り精度が上がらない。

これは2つの波形を同時にCRT上に出してその間の時間差を読み取らなければならないため、ほとんどの場合時間軸の掃引速度は0.1 msec/cmで測定しなければならなかった。このため0.01 msec単位でしか測定できない。このため0.005～0.01 msec程の読み取り誤差が生じることがある。これを音速度に換算すると±70～±150 m/sec程度の差となって現われる。

- 2) 時間を測定する基準点を波形のどこにおくかによって読み取られる時間差が異なってくる。

第1到達波は振幅も大きく、またノイズも少ないので問題は少ないが、それ以外の波は振幅が小さかったり、ノイズがあったりして波の開始点がわかりにくいことがあり、ここでの読み取り誤差も考えられる。また音源用パルサの出力波形は変化が急激でCTR上の輝線が見えず、時間を測定する基点での誤差も考えられる。

- 3) 垂直軸での最小分割単位が大きいため誤差があると考えられる。

最大感度は1v/cmで測定しており、この場合0.1v以内の読み取り誤差が生じる可能性がある。これは減衰率で表わすと±0.2～±0.3 dB/m程度である。

- 4) 波形が安定しないための読み取り誤差

時間・垂直軸の両方のついて、CTR上で必ずしも波形が静止せず、このため読み取り誤差を生じている。

以上のようなことが考えられるが、これらの測定誤差も音速にして±200 m/sec以内、減衰率では±0.3 dB/m以内であると考えられ、減衰率ではやや大きい、測定結果に対してさほど大きな影響を与えているとは考えられなかったため、今回の測定は事実上十分な精度で行なわれたものと考えられた。

## 5. ま と め

1. 今回の試験における導波棒の特性として次のことがわかった。
  - ① 導波棒自身の減衰は大きくなく  $1 \sim 1.5 \text{ dB/m}$  以下である。実際に使用する時はむしろ母材から導波棒への伝達率の方が大きな影響を及ぼすものと思われる。
  - ② 導波棒内の主要な伝播モードは板波（の一種）である。したがって導波棒が長くなれば音速度差による波形の分離が起きることが予想される。
  - ③ 管状のものは表面にゴム等の吸音材をつけることにより板波による波形分離の影響を除去できる。しかし、吸音材の存在による減衰もかなり大きい。
  - ④ 導波棒は太いものより細いものの方が板波による速度分散が少なく、波形分離も現れにくい。又、リングングも少なく波形がきれいであった。
2. 減衰測定を行うには、今回のような多重反射法では反射損失があるため不適當であると考えられた。すなわち、長さを変えた数種類の試料について第1到達波の信号電圧を測定することにより求めるのが最も良い方法と考えられた。これは、今回考えた反射損失の補正が平面波についてだけあてはまるものであり、導波棒のような細い棒中ではどうなるかが不明であるからである。
3. 音速の測定は今回の測定法でも問題は少ないと考えられるが、長さを変えた数種類の導波棒を使用して測定し、その平均値として得るのが適當であると考えられる。測定した音速度より、その波の伝播モードの推定がある程度行えた。
4. 今回の試験は、導波棒の端に送信用トランスデューサーをつけ測定したため、発生した模擬 A. E. 波のエネルギーはかなり有効に導波棒内に伝わったと思われる。ところが実際の場合には導波棒は他の試験材にたいていの場合垂直にとりつけられて、その試験材からくる A. E. 波を受信用トランスデューサーに導びくように使用される。その場合、導波棒に A. E. 波がどんなモードで入ってゆくのか、また結合部での減衰の度合いがどうなるかという問題が実用上重要である。

今後は試験材で発生した A. E. 波がまず発生位置より導波棒までの間をどのようなモードの波で伝わってくるのか、次に試験材より導波棒に伝わってゆくときはどのモードの波がよく伝わるか、さらにその波は導波棒内ではモードの変換を含めてどのモードの波で伝わってゆくのかを問題とすべきであることがわかった。

## 6. 参 考 文 献

1) 角田, 安藤, 五十嵐, 近藤

AE測定用導波棒の特性試験, PNC技術レポート N841-76-15

2) 超音波探傷法 日刊工業新聞社

3) ステンレス鋼便覧 日刊工業新聞社