

# 漁船用簡易外板腐蝕検定器に就て

— 共振法に依る超音波厚み測定 —

奈良迫嘉一・大屋典弘・山辺 亮

## Simplified Ultrasonic Shell-Plate-Flaw-Detector for Fishing Vessel

With the Use of the Standing-wave Technique in the  
Thickness-measurement

Yoshikazu NARASAKO, Sukehiro ŌYA and Akira YAMABE

In order to carry out the easy and accurate detection of the shell-plate-flaw in steel fishing vessels, irrespective of the inspection-location, whether at sea or in docking, a simplified ultrasonic shell-plate-flaw-detector for fishing vessels was devised with the use of the standing wave technique in thickness-measurement.

As the result of the repeated experiments the effectiveness of the newly devised detector was proved to be generally good, with the accuracy lying within 3% mean error in the thickness-measurement (max. 5%); with the confirmation that by the observation of resonance-image-changing phase even the flaw-depth could be detected, though, at present, whether it was in contact with salt water or not, it was better that there was no paint and no curvature on the plate surface.

### 1. 緒 言

一般船舶と異なり漁船は操業の特性から屢々外洋に無理な航海を行ない海難に遭遇する機会も多い。然るに強度並びに浮力の生命である外板保守に就ては経費の面もさる事ながら外板検査が技術的に非常に難かしく、従つて船主は勿論乗組員も安易な妥協におちいり、外板手入れ、取り換えをなござりにし、その結果往々不測の災害をもたらした例がある。従来行われている外板検査は主として次の二通りである。即ちテストハンマーに依り不良外板面を叩きその際発生する異常音を聴いて腐蝕度を判定する方法と、外板面に一々テストホールを穿ち、該部の厚み測定を行ない肉眼にてその腐蝕度を観察、爾后熔接で穴埋めをして置くと言う方法であつて何れも高度の経験的技術と多大の労作を必要とするものである。さて外板材の厚さは鋼船構造規程に依り一応各船一定なる事から逆に超音波共振法に依り片面からその厚みを測定すれば、航海中、ドック中を問わず容易にその腐蝕度を測定、常時予防措置をこうじ、船体安全を確保出来る訳である。著者等はこの目的を以て昭和32年4月以来約2年に亘つて本検定器の試作と性能改善に就て努力し、漸やく実用化への見透しを得た。茲に本検定器の構造とその性能の概要に就て報告する。

### 2. 実 験 器 材

パルス電圧発振器：本学文理学部物理学研究室にて試作されたもので、大きさ 45.7cm×24.3cm×25.7cm のケースに発振部、増幅部、変調部、検波部、電源部の5部が収納されてい



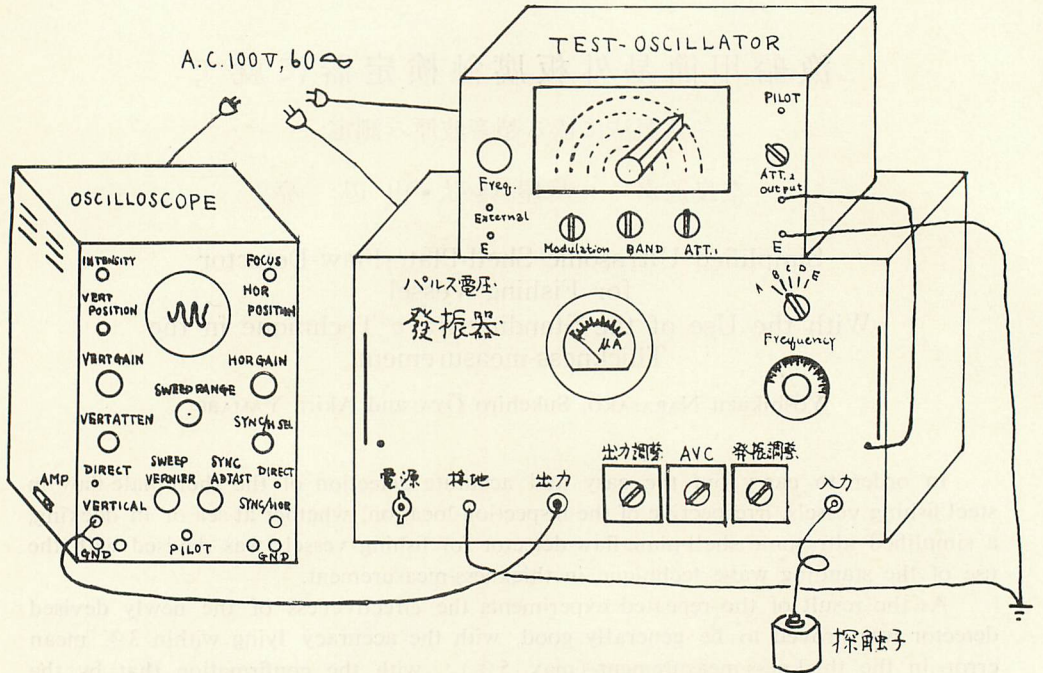


Fig. 1. Exterior view of simplified ultrasonic shell-plate-flaw-detector for fishing vessel with the use of the standing-wave technique in the thickness-measurement.

る。その外観は Fig. 1 に、配線図は Fig. 2 に示されている。真空管発振式であつて、その出力電圧を探触子（水晶振動子）に加え、之を金属板に接着させて測定板中に超音波を発射させるもので、発振周波数帯は 960KC ~ 1.223MC, 1.1835 MC ~ 1.9425MC, 1.857 MC ~ 3.004 MC, 2.840 MC ~ 4.575 MC, 2.085 MC ~ 3.367MC の 5 域に切り換えられる。尚共振図形を鮮明且つ鋭敏に作らせるため、レシーバー・ケースを利用、内部に 2 枚の鉄薄円板を入れ之に A.C. 60 cycle をかけて、その間に空気コンデンサーを形成、1/60 sec に 1 回の割で共振をさせて変調を行なうように作られ

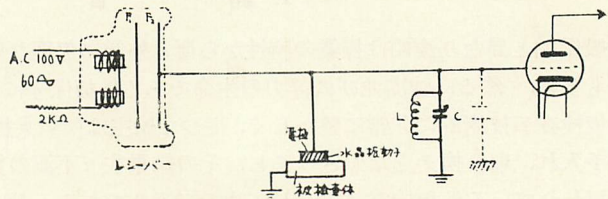


Fig. 3. Method of frequency modulation.

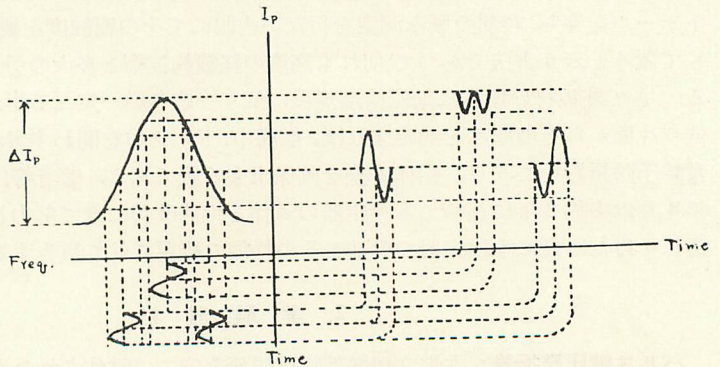


Fig. 4. Principle of frequency modulation.

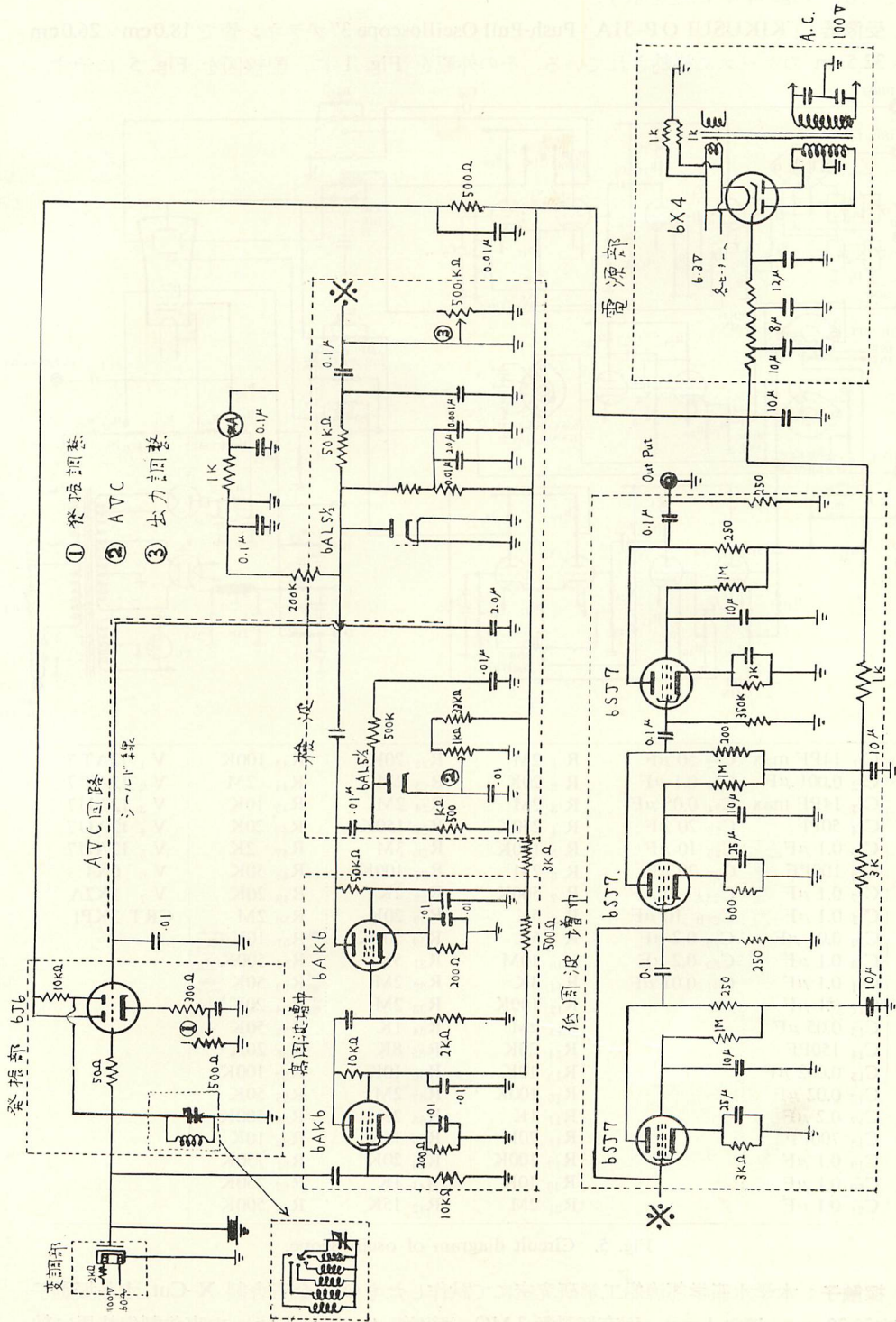
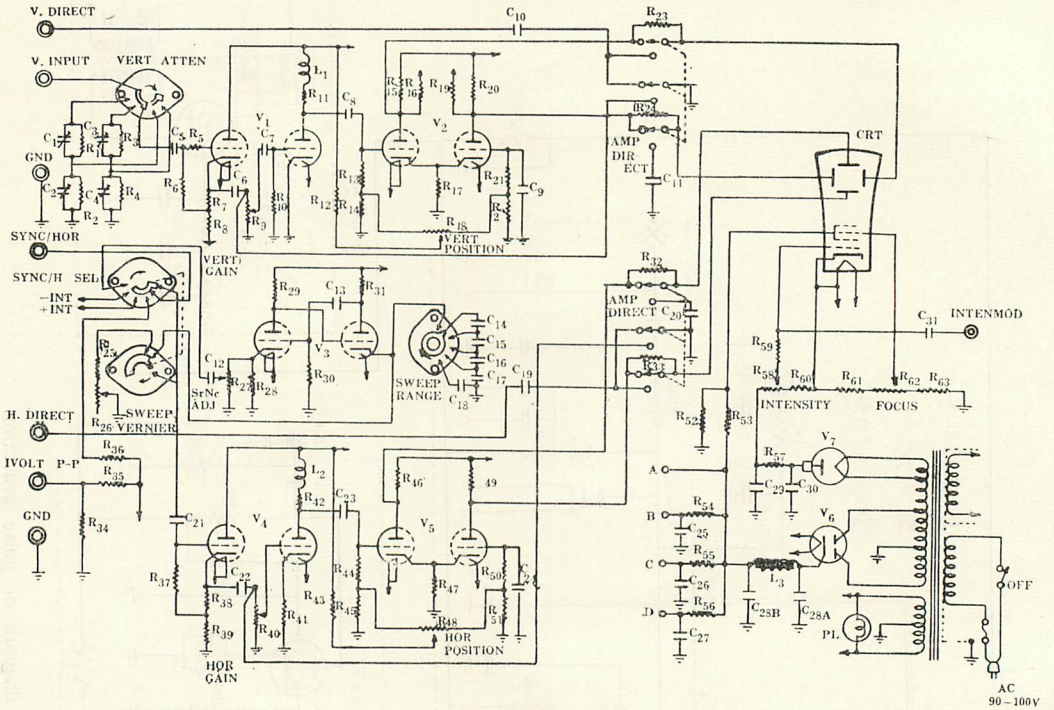


Fig. 2. Circuit diagram of pulse generator.



ている。Fig. 3, 4 に之を示す。

受像器：「KIKUSUI OP-31A」Push-Pull Oscilloscope 3'ブラウン管で 18.0cm×26.0cm ×32.5cm のケースに格納されている。その外観を Fig. 1 に、配線図を Fig. 5 に示す。



註

C <sub>1</sub> 14PF max	C <sub>22</sub> 50 μF	R <sub>1</sub> 2M	R <sub>22</sub> 20K	R <sub>43</sub> 100K	V <sub>1</sub> 12AT 7
C <sub>2</sub> 0.001 μF	C <sub>23</sub> 0.1 μF	R <sub>2</sub> 20K	R <sub>23</sub> 2M	R <sub>44</sub> 2M	V <sub>2</sub> 12AT 7
C <sub>3</sub> 14PF max	C <sub>24</sub> 0.05 μF	R <sub>3</sub> 2M	R <sub>24</sub> 2M	R <sub>45</sub> 10K	V <sub>3</sub> 12AU 7
C <sub>4</sub> 50PF	C <sub>25</sub> 20 μF	R <sub>4</sub> 250K	R <sub>25</sub> 150K	R <sub>46</sub> 20K	V <sub>4</sub> 12AU 7
C <sub>5</sub> 0.1 μF	C <sub>26</sub> 10 μF	R <sub>5</sub> 100K	R <sub>26</sub> 3M	R <sub>47</sub> 2K	V <sub>5</sub> 12AU 7
C <sub>6</sub> 100PF	C <sub>27</sub> 20 μF	R <sub>6</sub> 2M	R <sub>27</sub> 100K	R <sub>48</sub> 50K	V <sub>6</sub> 6X4
C <sub>7</sub> 0.1 μF	C <sub>28A</sub> 10 μF	R <sub>7</sub> 500K	R <sub>28</sub> 2K	R <sub>49</sub> 20K	V <sub>7</sub> 1X2A
C <sub>8</sub> 0.1 μF	C <sub>28B</sub> 10 μF	R <sub>8</sub> 5K	R <sub>29</sub> 20K	R <sub>50</sub> 2M	CRT 3KPI
C <sub>9</sub> 0.05 μF	C <sub>29</sub> 0.2 μF	R <sub>9</sub> 5K	R <sub>30</sub> 500K	R <sub>51</sub> 10K	
C <sub>10</sub> 0.1 μF	C <sub>30</sub> 0.2 μF	R <sub>10</sub> 10M	R <sub>31</sub> 5K	R <sub>52</sub> 500K	
C <sub>11</sub> 0.1 μF	C <sub>31</sub> 0.01 μF	R <sub>11</sub> 3K	R <sub>32</sub> 2M	R <sub>53</sub> 50K	
C <sub>12</sub> 0.1 μF		R <sub>12</sub> 100K	R <sub>33</sub> 2M	R <sub>54</sub> 20K	
C <sub>13</sub> 0.05 μF		R <sub>13</sub> 2M	R <sub>34</sub> 1K	R <sub>55</sub> 50K	
C <sub>14</sub> 150PF		R <sub>14</sub> 20K	R <sub>35</sub> 8K	R <sub>56</sub> 20K	
C <sub>15</sub> 0.002 μF		R <sub>15</sub> 10K	R <sub>36</sub> 10K	R <sub>57</sub> 100K	
C <sub>16</sub> 0.02 μF		R <sub>16</sub> 100K	R <sub>37</sub> 2M	R <sub>58</sub> 50K	
C <sub>17</sub> 0.2 μF		R <sub>17</sub> 1K	R <sub>38</sub> 2K	R <sub>59</sub> 500K	
C <sub>18</sub> 700PF		R <sub>18</sub> 20K	R <sub>39</sub> 15K	R <sub>60</sub> 10K	
C <sub>19</sub> 0.1 μF		R <sub>19</sub> 100K	R <sub>40</sub> 20K	R <sub>61</sub> 150K	
C <sub>20</sub> 0.1 μF		R <sub>20</sub> 10K	R <sub>41</sub> 1K	R <sub>62</sub> 250K	
C <sub>21</sub> 0.1 μF		R <sub>21</sub> 2M	R <sub>42</sub> 15K	R <sub>63</sub> 500K	

Fig. 5. Circuit diagram of oscilloscope.

探触子：本学水産学部漁船工学研究室にて試作したもので 金石舎製 X-Cut 水晶振動子 (直径 30mm, 厚さ 1mm, 固有振動数 3 MC, 両面銀メッキ仕上げ) を真鍮製保持器に納



めた無接地電極型のものである。振動子は3MCで指向角 $3^{\circ}48'$ 、1MCで $13^{\circ}52'$ である。保持器に就ては堅固で小型而も厚み振動を出来るだけ自由にし、厚み $\pm$ り振動、輪廓 $\pm$ り振動、屈曲振動を出来るだけ抑圧するものとして計画した。その外観はFig. 1、構造図をFig. 6に示す。尚測定に当つては被検査鋼板との間に接触用媒質としてヒマシ油を用いた。

**テストオシレーター：**三和無線測器研究所の製品SO-25で発振可能周波数は150KC~50MCで途中6段切換、寸法は26.2cm×17.3cm×33.5cmで外観はFig. 1に、配線図はFig. 7に示す。

**試験片：**造船用鋼材のサンプルとして下関三菱造船所より寄贈を受けたもので厚みは次の11通りである。即ち12.60mm, 12.00mm, 9.55mm, 8.60mm, 8.00mm, 7.25mm, 6.85mm, 5.80mm, 5.00mm, 4.03mm, 1.90mm, 上記材料を各板厚別に6cm×6cmの方形に切断、之に種々の加工処理を行ない、厚み測定と探傷を試みた。

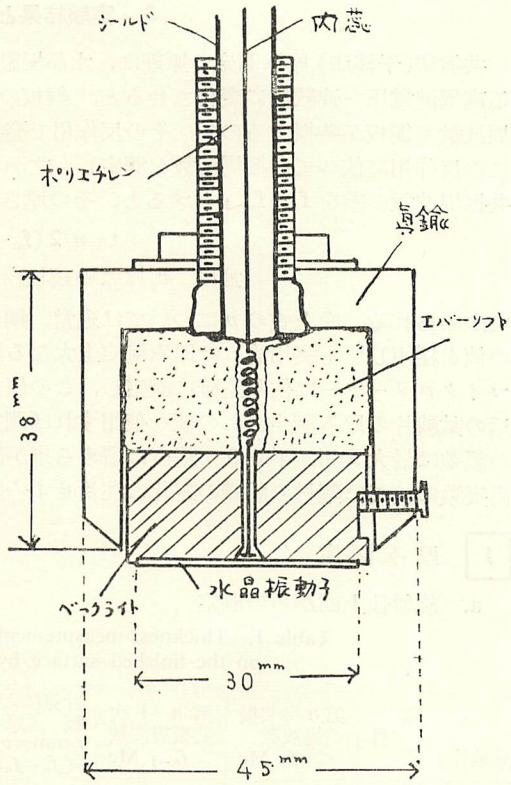


Fig. 6. Construction of searching unit.

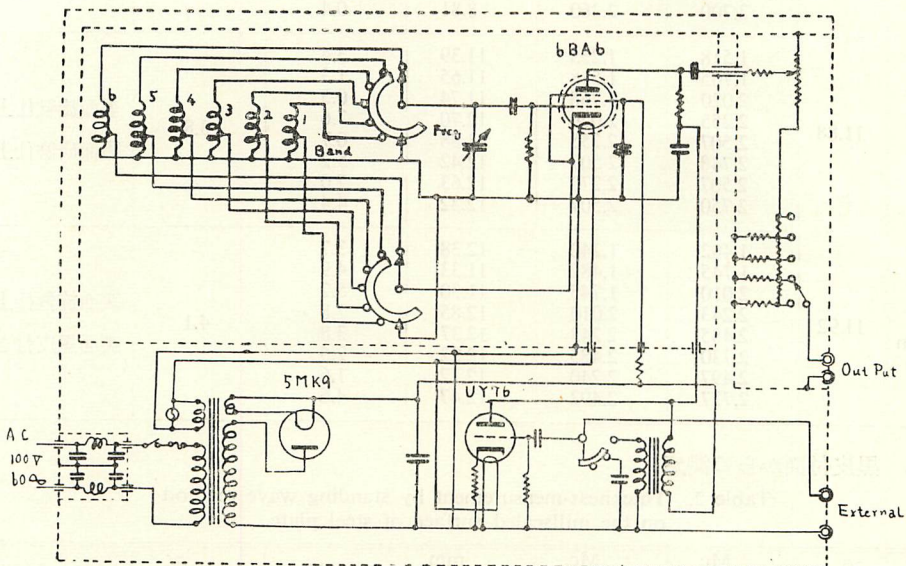


Fig. 7. Circuit diagram of test-oscillator.



3. 実験結果と其の考察

共振法(干渉法) 厚み測定の原理は、水晶振動子を鋼板の外側表面にあてて、それに加わる高周波電圧を連続的に変化させると、鋼板の厚さが半波長の整数倍に等しくなるような周波数で鋼板が共振するので、その反作用で発振器の電圧、電流に大きな変化を生ずる。この反作用に依つて共振周波数を測定し、之から厚みを算定するものである。即ち相隣る共振周波数の差を  $f_n - f_{n-1}$  とすると、その厚さ  $t$  は

$$t = v/2 (f_n - f_{n-1})$$

茲に  $v$  はこの鋼板内の縦波の伝播速度

で求められる。尚上式の  $v$  については通常、鋼に対して用いられる  $v = 5440 \sim 6320 \text{m/sec}$  の値を採用しても実用的には厚み測定上大なる誤差は生じないが、予じめ試験片の厚みをマイクロメーターに依り正確に測定し、この値を上式に代入、逆算に依つて  $v$  を求め、爾後の試験片の厚み測定にこの値を使用すれば測定精度を更に高くすることが出来、読みの誤差は最大 5%，平均 3% 程度に留める事が出来る。本試験片では  $v = 5991.2 \text{m/sec}$ 。尚実験に於ては鋼材の組織の変化に注目せず一応同質のものとして取扱つた。

1 厚み測定

a. 旋盤仕上面からの測定

Table 1. Thickness-measurement by standing wave method on the finished surface by lathe of steel plate.

試験片	項目	第 $n$ 次共振周波数 $f_n$ Mc	第 $n-1$ 次共振周波数 $f_{n-1}$ Mc	計算による板厚 $t_c, \text{mm} = v/2 (f_n - f_{n-1})$	測定誤差 % $\epsilon = \frac{t_c - t_r}{t_r} \times 100$	平均測定誤差 % $\epsilon_m$	面処理
マイクロメーターに依る厚さの実測値	8.77	1.695	1.347	8.60	1.9	1.6	表裏とも 研磨仕上
		2.026	1.695	9.05	3.2		
		2.363	2.026	8.88	1.2		
		2.700	2.363	8.88	1.2		
		2.700	2.360	8.81	0.4		
	11.88	1.518	1.255	11.39	3.4	3.8	表面旋盤仕上, 裏面研磨仕上
		1.765	1.518	11.65	1.3		
		2.020	1.768	11.74	0.5		
		2.255	2.020	12.70	7.6		
		2.507	2.255	11.88	0.7		
		2.748	2.507	12.42	5.2		
		2.507	2.270	12.63	7.0		
	2.750	2.507	12.32	4.4			
	mm $t_r$	11.92	1.482	1.240	12.38	3.7	4.1
1.745			1.482	11.33	4.9		
2.010			1.745	11.30	5.2		
2.243			2.010	12.85	7.8		
2.485			2.243	12.37	3.8		
2.730			2.485	12.22	2.5		
2.497			2.240	12.12	1.6		
2.727			2.492	12.47	4.6		

b. 黒皮付面からの測定

Table 2. Thickness-measurement by standing wave method on the millscaled surface of steel plate.

試験片	項目	Mc $f_n$	Mc $f_{n-1}$	mm $t_c$	% $\epsilon$	% $\epsilon_m$	面処理
-----	----	----------	--------------	----------	--------------	----------------	-----

mm $t_r$	5.62	2.110 2.627 2.628	1.590 2.110 2.110	5.76 5.79 5.78	2.5 3.0 2.8	2.8	表裏とも 黒皮付き
	8.86	1.690 2.015 2.360 2.690	1.340 1.690 2.015 2.360	8.56 9.22 8.68 9.08	3.4 4.1 2.3 1.4	2.8	同上

c. ペイント塗装面からの測定

Table 3. Thickness-measurement by standing wave method on the painted surface of steel plate.

試験片	項目	Mc $f_n$	Mc $f_{n-1}$	mm $t_c$	% $\epsilon$	% $\epsilon_m$	面処理
mm $t_r$ * 塗膜厚さを含む	8.13 (8.00)	1.860 2.215 2.590	1.470 1.860 2.215	7.68 8.43 7.93	5.5 3.6 1.8	3.6	表面黒皮上に A/cペイント 1回塗り、 裏面黒皮付き
	8.27 (8.00)	2.187 2.590	1.840 2.187	8.63 7.43	4.4 10.2	7.3	同上、但し A/cペイント 2回塗り

d. 裏面が接水している場合 (Fig. 8)

Table 4. Thickness-measurement by standing wave method when the back of steel plate is in contact with salt water.

試験片	項目	Mc $f_n$	Mc $f_{n-1}$	mm $t_c$	% $\epsilon$	% $\epsilon_m$	面処理
mm $t_r$	6.74	1.776 2.207 2.645	1.320 1.776 2.207	6.56 6.94 6.84	2.7 3.0 1.4	2.4	表裏とも 黒皮付き

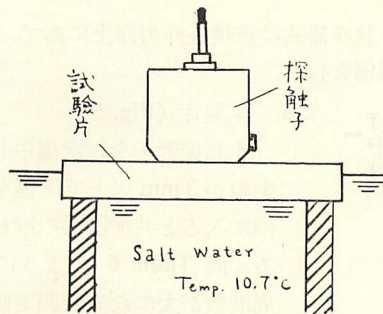


Fig. 8. Thickness-measurement when the back of test piece is in contact with salt water.

e. 裏面にペイント塗装のある場合

Table 5. Thickness-measurement by standing wave method when the back of steel plate is painted.

試験片	項目	Mc $f_n$	Mc $f_{n-1}$	mm $t_c$	% $\epsilon$	% $\epsilon_m$	面処理
-----	----	-------------	-----------------	-------------	-----------------	-------------------	-----



mm $t_T$ * 塗膜厚さを 含む	8.27 (8.00)	2.590	2.240	8.60	4.0	4.0	表面黒皮付き, 裏面黒皮上に A/c ペイント 2 回塗り
	9.02 (8.86)	1.670 2.365 2.700	1.327 1.670 2.365	8.70 4.30 7.70	3.5 46.8 14.6	21.6	

## f. 曲げ鋼板の測定

厚さ 5.62mm, 曲率半径 78.0mm; 厚さ 8.43mm, 曲率半径 181.5mm 何れの鋼板も凸面側に探触子をあて測定を行つたが共振点を探知出来ず。

## g. 表裏不平行な鋼板の測定

面角  $2'51'$  のとき共振点を探知出来ず。

従つて通常の外板用鋼材に就ては次の事が云える。即ち a, b, c の実験から面処理が黒皮付き, 旋盤仕上げ, 研磨仕上げの如何を問わず探触子との音響的接触が緊密な範囲では比較的エネルギー・ロスが少く 1.2 MC~2.8 MC の発振周波数で容易に且つ正確に共振像を捕えることができ、之より外板厚みを平均誤差 3% 以内で測定できる。

尚鋼面と水との境界面に於ける超音波エネルギーの反射率は 88% である事が知られているが、d の実験から航海中에서도内部から外板の厚さを検定出来ることが判る。c, e, f, g より探触子の使用に際してははかなり技術的な制約を受けることが知られる。即ち外板面の内外塗装は之をはぎとること、又外板の表裏面は出来るだけ平行で且つ曲げ外板の際も曲率は出来るだけ大きい方が望ましく、之に依つて探触子を被検査面に密着せしめ、水晶振動子の送受の音響的エネルギーを最大限に確保すべきである。

尚ペイントに就ては塗膜厚さが平均 0.25mm 以上になると境界面の勢力反射率が小なるため、減衰が甚だしく測定は不可能となることは注意を要する。

## 2 探 傷

厚み測定に準じ、探触子を聴診器式に被検査外板面上にあて、検査部位各点の共振図形を作りその映像の崩れから探傷を行う。

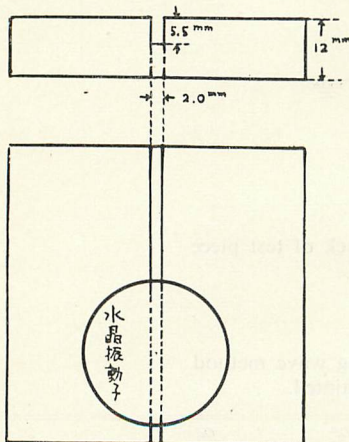


Fig. 9. Test piece-a.

## a. 試験片 (Fig. 9)

水晶振動子を逐次傷中心に近づけて行くときその距離が 3 mm 以上では傷を探知出来ないが 3 mm 以内に入ると共振図形の崩れから傷の存在を探知出来る。尚 Table 6 のように同一位置 (Fig. 9) でも周波数が大になると測定値が変ることは注目すべき点である。

## b. 試験片 (Fig. 10)

水晶振動子を常に傷の中心に置いたままドリルで順次拡大して行つた場合の穴に対する探傷実験を行つたが孔径 7.7mm 以上 (水晶振動子の面積の 5.1%) で始めて 1.580MC, 2.090MC のとき共振図形の生減が明確でなく像が崩れ傷の存在を認知できた。



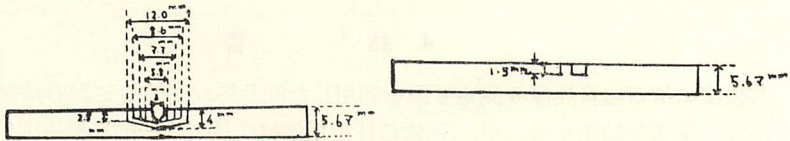
Table 6. Thickness-measurement by standing wave method on test piece-a.

試験片	項目	Mc		mm
		$f_n$	$f_{n-1}$	
mm $t_T$	12.0	2.190	1.712	7.7
		2.437	2.190	12.1
		2.680	2.437	12.3
		2.715	2.680	

c. 試験片

(Fig. 11)

この程度  
の穴の大き  
さでは何れ  
も傷の探知  
は不可能.



d. 試験片

(Fig. 12)

鋼板の裏  
面右半部に  
曲率半径約  
200 mm の  
凹部を作つ

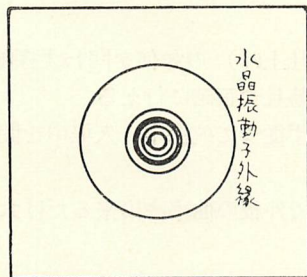


Fig. 10. Test piece-b.

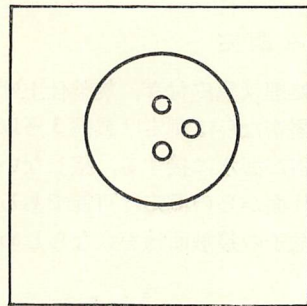


Fig. 11. Test piece-c.

て測定する。但し表面は何れも研磨。左半部に  
於ては典型的な共振図形、右半部では共振図形  
を視認できず。

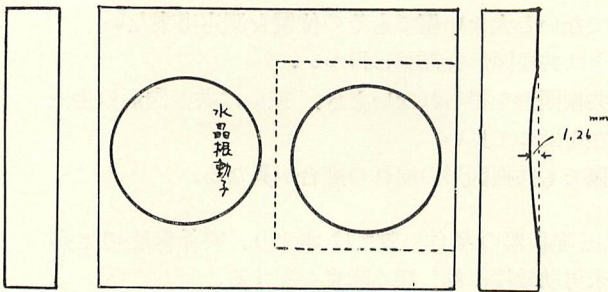
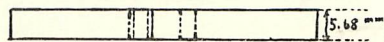


Fig. 12. Test piece-d.

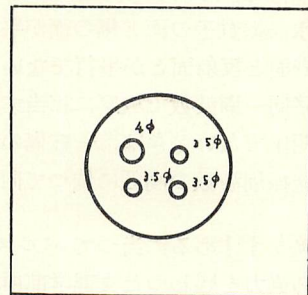


Fig. 13. Test piece-e.

e. 試験片 (Fig. 13)

共振周波数 1.585MC, 2.105MC に於ける共振図形は上下伸縮即ち振巾変化のみであるが、2.630MC に於て明瞭な共振図形の生滅を視認した。従つて同一周波数を使用すれば無傷部の共振図形との比較に依り探傷が出来る。

一般に同一大きさの水晶板では周波数が高ければ高い程、従つて波長が短ければ短い程鋭い指向性、強い反射率、大きな分解能を示し、その逆に媒質の粘性と散乱に依つて減衰



度が高くなることが超音波の特性として既に物理的に解明されている。吾々の実験に於てもこの事実を裏書きする如く a, b, c, e 試験片から外板面に対する水晶振動子の接触面積と内部傷の大きさととの割合に依り探傷され得る傷の大きさが決ることを知つた。更に d 試験片から底部曲面の存在は、超音波の指向性の故に音波の反射のエネルギーを極度に減少せしめ、共振図形を得る事が困難であることも知り得た。之等より同一箇所の探傷を周波数を種々に変えて行い、それからの探傷図の変化を比較すれば、欠陥の性状、大小、組織の状況等も或る程度判断出来ることにならう。

#### 4. 結 言

共振法に依る超音波厚み測定原理を利用した簡易外板腐蝕検定器の試作の結果性能的にもかなり優秀な結果を得たが、通常の外板用鋼材に就ては一般に厚み測定より探傷の方が技術的に困難であつて更に今後の研究が望まれる。

##### 1 厚み測定

1. 面処理（黒皮付き、旋盤仕上げ、研磨仕上げ）の如何を問わず探触子との音響的接触が緊密ならば測定は誤差 3% 以内で容易且つ正確に行える。
2. 外板が海水に接する、接しないに拘らず従つて航海中、入渠中を問わず、被検査外板の片面からの測定は可能である。
3. 探触子の接触面積を大ならしめる意味で外板の曲率は出来るだけ大きいことが望ましい。
4. ペイントに依る音波の減衰が甚だしいため、測定に当つては外板面より内外共之をはぎとる方が良い。

##### 2 探傷

1. 水晶振動子の面積と傷の大きさの割合により探傷され得る傷の大きさが決る。
2. 水晶振動子の面と傷の面が平行でないとき大きい傷でもその位置を測定出来ない。
3. 表面と反射面とが平行でないときは共振図形を視認し得ない。
4. 略同一周波数で板厚に相当する共振図形を得られないとき、或いは共振図形の生減が明確でないときは、一応傷の存在を疑つて良い。
5. 発振周波数の高低に依つて同一傷でも共振図形の崩れの度合が異なる。

本実験をすすめるに当つてパルス電圧発振器の製作に就ては素より、終始御懇切な御指導、御協力を賜つた文理学部中村末男助教授に対し深く謝意を表する。

#### 文 献

- 日本學術振興會：超音波探傷法，丸善株式会社（昭和 31 年）  
 日本非破壊検査協会：非破壊検査の実際，オーム社（昭和 32 年）  
 丹羽 登：超音波応用，共立出版株式会社（昭和 31 年）