U.D.C. 534.84.08: 621.642.34

日立製作所における水中音響測定用水槽

The Water Pool for Underwater Sound Measurements at Hitachi, Ltd.

芳 賀 正 浩* Seikō Haga

内 容 梗 概

水中音響機器特性の測定用として日立製作所戸塚工場内に鉄筋コンクリート製,内法深さ4m,幅5m,長 さ20mの水槽を新設した。この水槽は比較的大形でその測定に際して広い音場が必要であるような水中音響機 器の測定にも適するように設計されたものである。水槽の壁の内面はパルス音波測定に適するよう部分的吸音 構造とした。吸音材には松くさびを使用した。

測定によれば、吸音壁の音圧反射率は通常の使用周波数範囲でほぼ10%以下で、また吸音材の取付位置も適 性であり、パルス音波測定に対しては十分使用しうることがわかった。

_____ 71 _____

1. 緒 言

水中探信儀などで測距距離を延長するため,水中減衰の少ない低 周波音波を使用するような場合には,これに使用する送受波トラン スデューサは比較的大形のものになる。また他方測角精度が特に要 求されるような場合は輻射面の寸法を波長に比して非常に大とする か,あるいは音響レンズまたは音響反射鏡を用いるかして送受波指 向特性を尖鋭にする必要がある。上記いずれの場合でもこれらトラ ンスデューサの音場特性を測定するためには特に広い音場が必要と なってくる。



われわれは日立製作所戸塚工場内に上記の目的に適する測定用水 槽を新設した。

測定用水槽の設備に際して特に考慮すべき点は一般に次のような点であろう。

(1) 測定点を被測定機器の近距離音場を脱する距離に選べる程 度の広さを有すること。

(2) 水槽内の測定点では直接波音場以外の作用を受けない構造であること。

(3) 水槽内の媒質すなわち水質は安定で異常減衰などが生じない措置がなされていること⁽¹⁾。

(4) 測定に際して作業が円滑に遂行できるような付帯設備などの配慮がなされていること。

われわれが今回の水槽を設備するに際して特に重点を置いたのは 上記のうち(1)および(2)項である。これらについては次項以下 において述べる。(3)項については本水槽のように屋外設備のとき は外界の影響を受けやすく問題を起す危険性も考えられたが,使用 時に音圧分布をチェックすることによってその悪影響をさけること も可能であるから今回は特別な配慮は払わなかった。将来の状況を みた上で必要な場合は考慮しなければならないと考えている。また (4)項については省略する。

第1図および第2図の写真は本水槽の外観および内部吸音材配置の模様の一部を示すものである。

2. 構

第1図 水 槽 外 観



第2図 水 槽 内 部

2.1 構造寸法

水槽の寸法は被測定機器の形式,輻射面の大きさおよび波長など で定まる。

造

波長に比して輻射面積が大きい場合は、いわゆる近距離音場域が 大きく測定点を輻射面より相当の距離にとらないと真の遠距離音場 特性は得られない。たとえば円形ピストン膜振動⁽²⁾を考えると、通

* 日立製作所戸塚工場

常遠距離音場に対して適用されているピストン中心軸上の音圧**ク**は 次式であらわされる。



ただし ρ は媒質密度, cは媒質中の音速, v_0 は輻射面の速度振幅, Rはピストン膜半径, λ は媒質中の波長でxはピストン中心軸上の 368 昭和35年3月

論

H

距離である。

これは次式の近似式であって

$$p = 2 \rho c v_0 \sin \frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{x^2 + R^2} - x) \dots (2)$$

(1)式の近似の程度を仮に2%にとどめるとすれば $\pi R^2/2\lambda x < 0.4$ となり、たとえば 15 kc (λ =0.1 m)、 R=0.5 m のものでは x は 10 m 以上でなければならないことになる。

また音響レンズあるいは音響凹面反射鏡などを用いる音響機器に おいては,たとえばこれが受波器の場合には測定音源の距離を十分 とらないと音像位置は焦点と合致しないのでこれまた真の特性を示 さないことになる。たとえば焦点距離が30 cm である放物反射鏡で 音像位置の焦点よりの偏差を 1 cm にとどめるとすれば、次式の関 係式から

(ただしfは焦点距離, xは音源と反射鏡間の距離でyは音像と 反射鏡間の距離である)

xは約10mより大に選ばなければならないことになる。

われわれは水槽の寸法を選ぶにあたって、上記のような目的にも かなりまで適用できるものであることが望ましいと考え、内法で長 さ20m, 幅5m, 深さ4mの鉄筋コンクリート製とした。

2.2 吸音材の配置





水槽内の測定点は,直接波音場以外の作用を受けてはならないの で、もし連続音波による測定を行うとするならば、内壁はすべて吸音 性としなければならない。パルス変調音波による場合、パルス幅を せまくして測定点における直接波と反射波とを分離できればよいの であるが, パルス幅を小にできる限度は測定系の周波数帯域幅で決 定されるのでこの方法も常に有効であるとはいえない。したがって パルス変調波による測定を行う場合でも,直接波に続いて到達する 一回あるいは二回反射などに対してはこれが有害な影響を生ぜしめ ぬ程度に減衰を与えておく必要がある。それゆえこの場合にも少な くともこのような反射波に対して効果のあるように吸音材を用いな ければならないことになる。

以上のような要求に対する水槽の一つの形式として、被測定機器 と測定点との中間に小開口音響しゃへい窓を設け、これによって有 害反射波を除去する方法も試みられているが(3)、われわれは構造が 単純でかつ種々の使用に対しても比較的便利と考えられる次の方法 によった。

第3図はその説明図である。被測定機器(たとえば図中の音源) および測定点(たとえば図中ハイドロフォン位置)は水槽の幅およ び深さに対しては中央に位置させることが多く、また両者間の最大 距離も上図程度であると考えると、たとえば水面および底面による 一回および二回反射波の行路は(イ)図に示すようになる。そこでわ れわれは図に示すように吸音材を配置してこれらの反射波に対して 途中少なくとも一回は減衰を与えることにした。三回以上の反射波 に対しても同様である。また(ロ)図によると側面の反射に対しても ほぼ同様な効果が得られることがわかる。また長さの方向に対する 端面部分およびこれに隣接する部分はもちろん吸音性としなければ ならない。

音 材 2.3 吸

吸音部に使用する吸音材としては,吸音性の円錐,くさび,リ ブ、多孔性フレームそのほか板状吸音材料など種々考えられている が(4)(5)、われわれは古くから賞用されまた入手も容易である松材に よるくさび形式のものを採用した。第4図はその寸法,第5図はそ の外観を示すものである。くさびによる吸音効果の理論的解析はき わめて困難であるが、概念的には水から吸音材に音波が入射する場 合,くさび状にして徐々にインピーダンスを変化させ,特に不連続 な境界面を除いてインピーダンス整合を行うものであると解釈され ている。 くさびをコンクリートに植えるにはあらかじめ2cmの厚さの松板 を壁に取付けておきこれにくぎ付けした。また水面用のものには松 板を張った適当寸法のわく組を作りこれにくさびをくぎ付けした。

送受距離を短縮しても支障がない場合には図中 A-A' 面に対して 対称になるように近接せしめるのが効果的である。また図でわかる ように長さ方向の中央部には帯状の吸音部ができるので比較的小形 のトランスデューサの校正などにはこの部分が有効に利用できるわ けである。

水面くさびの長さ方向に平行な中央部分は簡単に移動できるよう にしてトランスデューサなどの移動に支障なき構造とした。



第5図 吸音くさび外観

2.4 外部妨害音

水槽も空中無響室同様に外部からの妨害音は極力小さくすること



(側面図)
第6図 垂直反射率測定法

振動子で,水平方向指向性はいずれもほぼ無指向性で,垂直方向指 向性は音圧半値幅で,10 kc では約 90 度,20 kc では約 50 度(以上 Ni 製),30 kc および 50 kc では非常に広く,100 kc では約 60 度(以 上 BaTiO₃ 製)である。

3.1 吸音壁およびコンクリート壁などの音圧反射率

369

が望ましい。当初水槽位置が東海道国鉄線路に近いため,列車走行 振動の地中伝播による妨害が懸念されたので,設備前に近くにあっ た防火用水池を使用して妨害の程度を実測してみた。その結果その 程度はほとんど無視できるものであることがわかったので予定どお りの位置に決定し,深さ方向の約3mを地表面下とした。現在の水 槽においても外部妨害音の悪影響はまったくみられない。

3. 音響特性

以下パルス変調音波法による水槽の音響特性の測定結果について 述べる。測定は吸音壁およびコンクリート壁などの音圧反射率につ いて行い,ついで水槽内の音圧分布を調べてみた。

測定に使用した音源およびハイドロフォンは,20 kc 以下では Ni パイプ製磁わい振動子,30 kc 以上では BaTiO₃ 薄肉円筒製電わい 第6図のように水槽内に音源およびハイドロフォンを配置しパル ス幅を適当に選ぶと、ハイドロフォンの出力波形で、左側の壁の垂 直一回反射波を直接波およびその他の反射波より明りょうに識別で きる。

第7図(イ)および(ロ)は壁としてコンクリートの部分を選んだ時 の観測波形である。受信パルスを分離する必要からパルス幅をせま くしたため過渡現象が十分終了していないものもあるが,相対的な レベルを比較するためには十分である。水中音速と各受信パルスの 時間間隔とから図中の波形で(a)は直接波,(b)は対象とする反射 波,(c)(d)および(e)はそれぞれ第6図に示したような反射波で あることがわかる。なお,(c)および(d)の波形は第6図において 音源,ハイドロフォンを含む水平面に対して(c)および(d)と対 称な行路をもつ反射波とのそれぞれの合成波であることはもちろん









第8図(イ)および(ロ)は壁として吸音材を





吸音側壁反射観測波形

第8図



(平面図)

音 源

深度 277



論

取付けた部分について同様な測定を行った結果である。

ついで第9図のような音源およびハイドロフォンの配置によって 側壁の斜入射に対する反射の大きさを測定してみた。この場合も着 目する壁からの反射波をほかの波形から分離できるような位置とパ ルス幅を選ぶわけである。この結果の観測波形は省略する。

以上述べた垂直入射および斜入射についての観測波形から音圧反 射率を求めるには次の方法による。

反射の存在しない球面拡散音場においては次式が成立する(6)。

ただし ρは音源より r なる距離にある点の音圧, ρは媒質密度, cは媒質中の音速, S は輻射面積, vo は輻射面の平均速度振幅で λ は媒質中の波長である。

したがってRを比例定数とすれば

とおくことができる。

それゆえ測定点における直接波および第一回反射波の音圧をそれ ぞれ p1 および p2, その行路長をそれぞれ r1 および r2 とし, また反 射壁が完全反射平面であるとしたときの測定点の音圧を p2'とすれ ば次式の関係が成立する。







で定義されるから、結局(6)~(8)式から

となる。

(9)式は音源およびハイドロフォンが完全に無指向性であるとき なりたつ関係で、指向性のある場合は補正を要する。

上述の方法により側面壁の垂直反射および斜反射の観測波形から 音圧反射率を求めると第10図のとおりになった。

平面境界面をもつ媒質1と媒質2があり, 媒質1から境界面に音 波が入射するときの音圧反射率は次式で計算される(8)。すなわち全 反射を起す入射角以内では



ただし ρ_1 , ρ_2 は媒質1および2の密度, c_1 , c_2 は媒質1および 2中の音速でθは入射角である。

であり, 全反射を起す入射角以上では

 $\Gamma = 1$ (11)

である。



水面反射测定法 第11図

に対する変化の傾向はほぼ一致していることが認められる。第10 図において100%をこす実測値が示されているがこれは測定誤差で ある。

吸音盤においては波長に比して平坦度が非常に粗であるといえる から上記平面反射の理論が成立しなくなることが予想されるが、や はり上述のような傾向はない。

以上は水槽の側壁の反射に関するものであるが、底面反射につい ても同程度と考えてよい。

ただ水面においては境界条件が他と異なるので同様には考えられ ない。第11図のような方法によって水面および水面吸音材の反射 率を測定してみた。実験は入射角30度に対するもののみとした。こ れは水面反射はほぼ完全反射であるゆえ反射率は入射角には無関係 で、また水面吸音材においても第10図の結果から特に入射角によ り大きく変化するものでないと考えたからである。結果は第12図 および第13図のとおりである。第12図は水面反射を示すもので ほぼ100%の音圧反射率を示している。第13図は水面吸音材の反 射を示すものである。この場合くさびの深度によって反射の程度に 多少の変動が認められたが、くさび尖端の深度が 20cm 程度では図 のとおりになり音圧反射率は約15%であった。

3.2 水槽内の音圧分布

— 74 —

今コンクリート壁の反射に上記の理論を適用してみる。すなわち コンクリートの厚さを無限大と近似し媒質の定数を下記のように仮 定する。

水 : $\rho_1 = 1.0 \text{ gr/cm}^3$ $c_1 = 1.5 \times 10^5 \text{ cm/s}$ コンクリート⁽⁹⁾: $\rho_2 = 2.3 \text{ gr/cm}^3$ $c_2 = 3.5 \times 10^5 \text{ cm/s}$ その結果得られる計算値は第10図に示すとおりになり、これと 実測値とを比較すると,入射角の小なる範囲の反射率および入射角

水槽を実際に使用する場合には第14図のような水槽の長さの方 向に平行な中心軸(x軸,以下同じ)に沿い被測定機器および測定 点をおくことが多いので、この軸上における直接波音圧分布をまず 測定してみた。音源Sは図の位置に固定し、ハイドロフォンRはこ の軸上を移動せしめる。測定はすべてパルス変調音波法による。 結果は第15図および第16図に示すとおりで、前節(5)式で示 した距離に逆比例する関係がほぼ満足されていることがわかる。測

立製作所における水中音響測定用水槽 日



371

時間差が十分であるので分離も容易であるが, x が増すにつれ時間 差が少なくなり、またレベル差も縮まってくる。しかしx=13m程 度になると吸音壁が作用し反射波は減衰をうけ始め、距離がさらに 増すとその程度がますます大きくなりx=17m程度ではほとんど直 接波のみになる。

以上は音源を水槽の端に固定した場合の結果であるが,2.2節で 触れたように距離を短縮しても支障のない使用状態では第3図に示 す A-A' 面に対して対称になるように近接せしめれば吸音材および 場は多少乱れてはいるが偏差は ±1dB 以内であるからかなり大形 の音響機器の測定にも本水槽は使用できることがわかった。

言 4. 結

以上今回設備した測定用水槽について述べたが、要約するとつぎ のとおりである。

水槽の広さの効果を十分発揮できることはもちろんである。第17 図(ル)はその一例を示すものでx=9mである(へ)図の状態と比較 してみると明らかにその効果がわかる。 つぎに、音源を第14図の示す位置に固定し、ハイドロフォンを 中心軸と直交する面内で移動してこの面内の音圧分布を測定した。 このときの結果を第18回に示す。同図の結果から、この面内の音

— 75 —

(1) 水槽は大形機器の測定にも適するよう、その内法を20m× 5m×4mとし、内面は松材くさびによる部分吸音構造とした。 (2) 測定によれば通常の使用周波数帯での無吸音部分の音圧反 射率はコンクリート壁で約60%以上,水面で約100%であった が,吸音部分では約10%以下であった。 (3) パルス音波により水槽の長さ方向の中心軸上の音圧分布お







よびこの軸と直交する面内の音圧分布を測定したが,いずれも反 射による特に大きい干渉はうけぬことがわかった。

(4) 以上により本水槽はかなり大形の音響機器の測定に十分使 用できることがわかった。

なお,異常減衰のような現象は目下のところ未経験の問題である が,水質の管理については今後検討したいと考えている。

最後に本水槽の設備に際して設計から完成にいたるまでご指導お よびご援助をいただいた防衛庁第五研究所伊藤,新保両室長ならび に同志社大学斎藤教授に対し深甚の謝意を表す。

参考文献

(1) 実吉, 奥島: 音響学会誌 14, 310 (昭 33-12)

- (2) 早坂,小林(訳): Stenzel 音響指向性計算 70 (昭19)
- (3) 中野他:通信学会全国大会予稿 37 (昭 32)
 (4) 実吉他:通信誌 27,759 (昭 18-11)
 (5) 関本:超音波専問委資料 (昭 33-9)
 (6) Lord Rayleigh: The Theory of Sound II, 279 (1929)
 (7) 実吉:通信誌 28,69 (昭 19-2)
 (8) Lord Rayleigh: 前出,81
 (9) J. R. Leslie and W. J. Cheesman: Proc. of America Concrete Inst. 46, 17 (Sep. 1950)

— 76 —