

119 板状進行波源により形成される水中音圧分布の実験的考察

An experimental study of the sound field in water generated
from a vibrating plate with flexural traveling waves

正 中川 紀壽 (広島大) 正 里信 純 (広島大)
○学 伊藤 隆雄 (広島大院)

Noritoshi NAKAGAWA, Jun SATONOBU, Takao ITO
Hiroshima University, Graduate School of Engineering, 1-4-1 Kagamiyama,
Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8527, Japan

Many measurements and considerations of the sound pressure distribution in water which is generated by the source of standing wave have been reported. It is clear that it doesn't become uniform distribution when the source of standing wave is used in water. In this paper, the sound pressure distribution in water generated by the source of traveling wave is measured by using a hydrophone and compared with the value measured with the source of the standing wave.

Key Words : Traveling wave, Hydrophone, Sound pressure

1. はじめに

水中における音圧分布の測定, および, 数値解析は現在までに多く報告されているが, それらの多くは, 定在波源を用いたものである. 定在波源を用いた場合, その音圧分布は水中に生じる音圧変化の定在波によって不均一となり, 水面に対して平行な音圧の不均一分布を生じることが明らかとなっている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾.

そこで, 本研究では, 定在波源の代わりに進行波源を用いた振動系を試作し, その基礎となる振動系における進行波源の動作特性, 及び, それを水中において駆動した時の水中の音圧分布の形態について実験的に考察している. 具体的には, 進行波源により形成される水中の音圧分布をハイドロホンを用いて測定し, 定在波源による場合の結果と比較することにより, その両者の特徴と違いについて考察している.

また, 進行波源を用いた振動系の試作の際に用いた汎用構造解析ソフトによる形状変化のシミュレーション結果と振動系の動作特性についての実験結果を比較している.

2. 進行波励振のための振動系の構成⁽⁴⁾

この板状進行波源を持つ振動系では, たわみ波を伝える振動板の両端に, 縦振動子を板と直角に取り付け, 片方を送波用とし, もう一方を受波用としている (Fig.1). 高周波電力を機械振動に変換する振動子には, 効率よく大きい振幅を取り出すために, ボルト締めランジュバン型振動子を用い, さらに, 振動振幅を大きくするために, 本実験装置では, Fig.2 に示すような, 鋼製のステップ型

ホーンを用いている. 振動振幅は約 4 倍に拡大される. また, ホーン先端は効率よく進行波が励振されるように幅を 5mm としている. 共振周波数は 28kHz に設定して設計している. ホーンの設計は, 汎用構造解析ソフト ANSYS を用い, 有限要素法によるモーダル解析を行って設計した⁽⁵⁾ (Fig.3). また, 共振周波数で駆動したときの形状の時間的変化のシミュレーション結果を Fig.4 に示す. ホーンの長さ方向に振動していることが分かる.

振動板の自由端から振動子 (ホーン先端) を取り付け位置までの距離は, 波長との関係により決定する. 受波用の振動子の電気端子には, 振動板と振動子の機械端子との整合をとるため, インダクタンスと抵抗が取り付けられている.

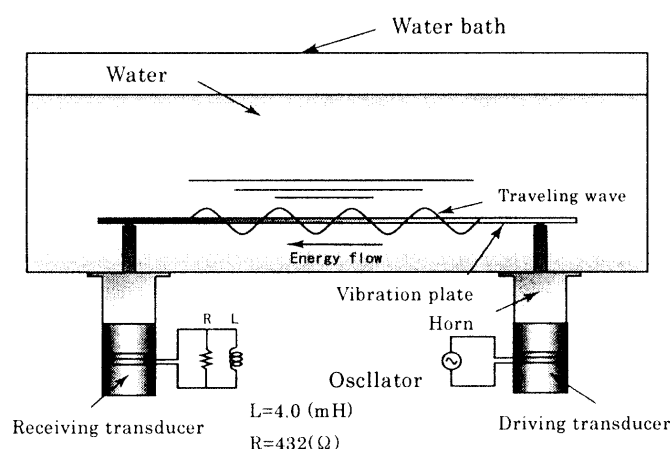


Fig.1 Schematic of the vibration system with a source of traveling wave

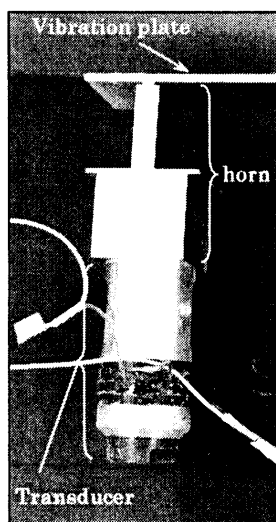


Fig.2 Shape of the vibration system

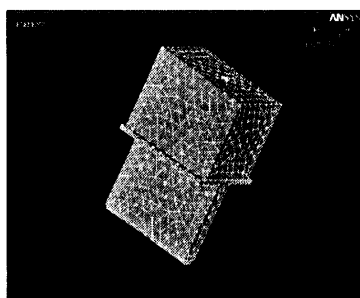


Fig.3 Model of the horn for numerical simulation

Start

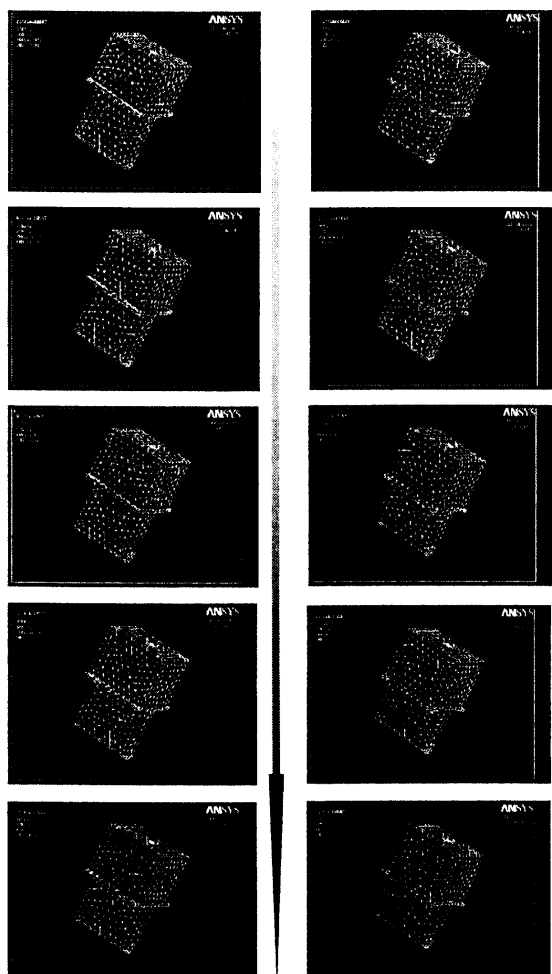


Fig.4 Vibration of the horn by numerical simulation

3. 振動系の動作特性

Fig.2 に示す振動系において、レーザドップラー振動計を用いて、ホーン先端の中央における振動速度と励振周波数の関係を求めた。Fig.5 にその測定結果を示す。この結果より、駆動用振動系の共振周波数は 27.37kHz、受波用振動系は 27.36kHz であることがわかる。駆動用振動系の振動速度が受波用振動系に比べ、小さい値をとっていることが分かる。振動が小さい方を駆動用としたのは、受波用に振動が大きい振動系を取り付けた方が、効率よくパワーが吸収されるためである。これは、実際、実験により明らかとなっている。

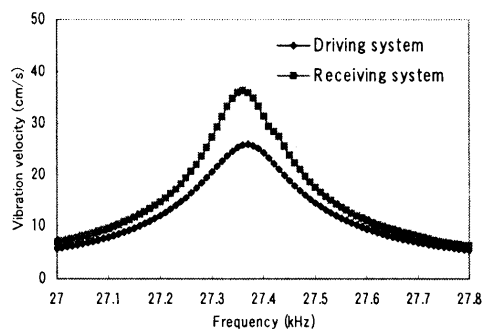
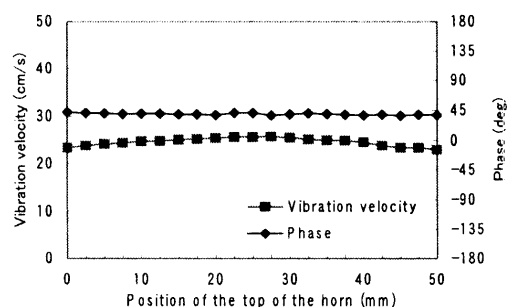
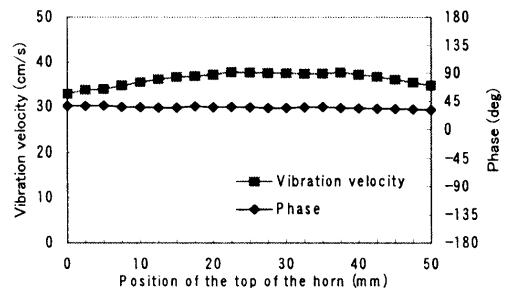


Fig.5 Vibration velocity measured as a function of the exciting frequency

同様に、ホーン先端の振動速度分布をレーザードップラー振動計を用いて測定した。Fig.6 にホーン先端の位置と振動速度、位相の関係を示す。ここで、(a)は駆動用振動系を、(b)は受波用振動系を表している。これよりホーン先端では、ほぼ均一に振動していること、また、同位相で振動していることがわかる。以上からシミュレーション結果と合致しているといえる。



(a) Driving system



(b) Receiving system

Fig.6 Vibration velocity and phase of the top of the horn

4. 振動板上の進行波

Fig.7に示す振動系において、励起程度を知るために、レーザドップラー振動計を用いて、振動板上の振動速度分布を測定した。振動板上の2点間A,Bを結ぶ直線上において測定し、振動速度分布を求めた。また、2点間C,Dを結ぶ直線上においても同様に測定し、振動速度分布を求めた。C,D間における振動速度分布をFig.8に、また、A,B間における振動速度分布をFig.9~11に示す。

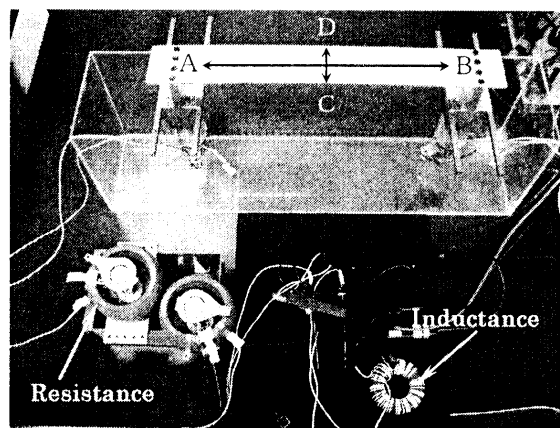


Fig.7 Connection between each device

Fig.8より、C,D間における振動速度分布は同位相で、ほぼ均一に振動していることが分かる。

Fig.9は、振動板に進行波を、Fig.10は、定在波をそれぞれ励起したときの測定結果である。Fig.9において、駆動点は横軸の負の方向側に、吸収点は正の方向側にあるため、進行波は図中を左から右へと進む。図から分かるように、半波長ごとに振動の腹が現れている。図には、振動速度と共に位相分布を示しているが、振動板上を右向きに進む進行波は、一般に、 $Y=A \sin(\omega t - kx)$ 、ただし、 k は波数、で表されるので、位相 $(-kx)$ は負の傾きとしてプロットされる。振動速度、位相の波形によりSWR (Standing Wave Ratio; 定在波比)が2程度の進行波が励振されていることが分かる。一方、Fig.10からは、定在波が励振されていることが分かる。

さらに、この振動系が水中においても進行波を励振することができるかどうかを調べた。振動板の片面を水中に浸水させ、同様に振動速度分布を測定した。その結果をFig.11に示す。これより、水中においても振動板上には進行波が励振されていることが分かる。

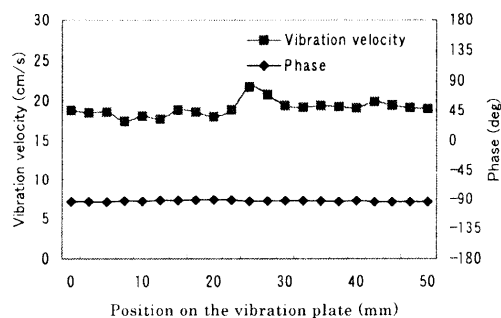


Fig.8 Vibration distribution on the vibration plate (C-D)

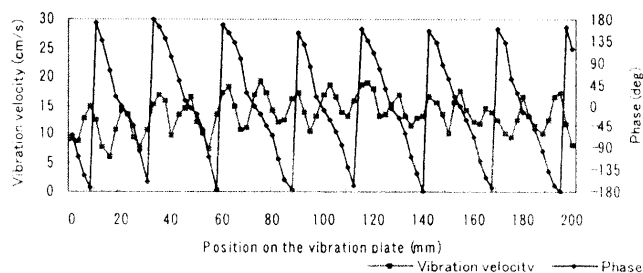


Fig.9 Vibration distribution on the vibration plate (A-B) - Traveling wave

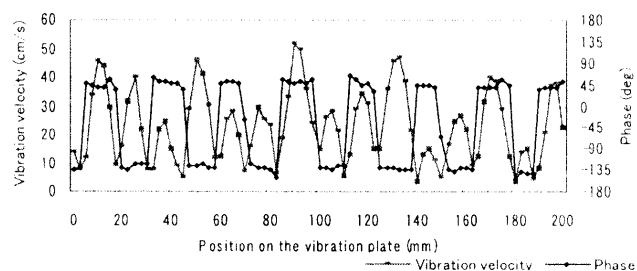


Fig.10 Vibration distribution on the vibration plate (A-B) - Standing wave

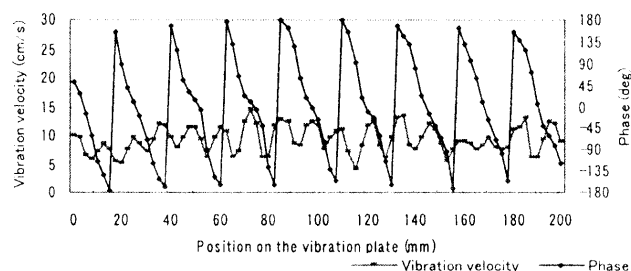


Fig.11 Vibration distribution on the vibration plate (A-B) - Traveling wave (One side in water)

5. 水槽内の音圧分布

水槽内の音圧分布をハイドロホン (Bruel & Kjaer : Type 8103) を用いて測定した。水槽に共振水位である84mmの高さ (振動板の位置をゼロ点とする) まで水を入れ、その水温を18℃に保った。測定の際に用いた水槽内における座標系をFig.12に示す。測定位置は、振動板の長さ方向 (x方向) に10mm間隔で44点、振動板からの高さ方向 (z方向) に5mm間隔で12段、合計528点において測定した。

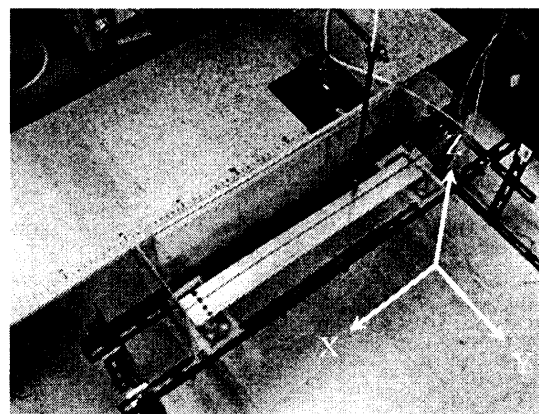


Fig.12 Coordinates of the water bath

音圧分布を二次元のグラフに表したものが Fig.13~14 である。Fig.13 は振動板に定在波を励振した場合の水中の音圧分布を、Fig.14 は振動板に進行波を励振した場合の水中の音圧分布をそれぞれ表している。横軸は振動板の位置を、縦軸は振動板からの高さをとっている。横軸の 0,440(mm) の点はそれぞれ駆動点、吸収点を表している。

まず、定在波源である音圧分布の Fig.13 は、振動板から 40mm 程離れた所で音圧が高くなっていることが分かる。これは、水槽内で z 方向に生じた圧力変化の定在波の腹の部分にあたるためである。さらに、振動板の 300mm の位置を過ぎてから音圧が小さくなり、駆動点から離れるほど音圧は小さくなっている。水槽内全体を見ると非常に音圧が大きい部分と非常に小さい部分が点在しており、定在波源を用いた場合は全体的にムラが多く、不均一性が著しい。

一方、進行波源である音圧分布の Fig.14 は、格子状に音圧の分布が生じていることが確認できる。これは、 x 方向と z 方向に生じた定在波のためであり、 x 方向の音圧変化の間隔が、その定在波の半波長 (27.5mm) になっていることから裏付けられる。 x 方向による定在波が生じた原因としては、進行波源である振動板から x 方向に音響パワーが放射され定在波が形成されたものと考えられる。水槽内全体を見ると、Fig.13 と比較しても分かるように、音圧分布の変化はあまり存在しないことが分かる。

また、音圧分布を三次元のグラフに表したものが Fig.15~16 である。Fig.16 を見ると全体的に音圧が分布し、Fig.15 と比較して音圧差の小さいことが分かる。

以上から、定在波源よりも進行波源を用いたほうが音圧分布の変化が少なくなるといえる。

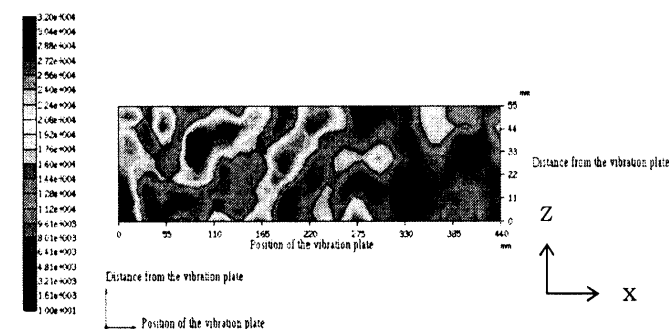


Fig.13 Distribution of the sound pressure in water (Standing wave, 2 Dimension)

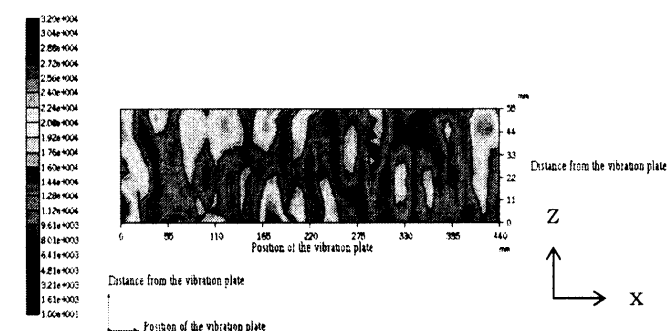


Fig.14 Distribution of the sound pressure in water (Traveling wave, 2 Dimension)

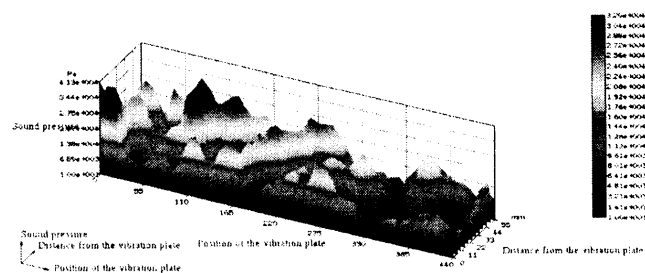


Fig.15 Distribution of the sound pressure in water (Standing wave, 3 Dimension)

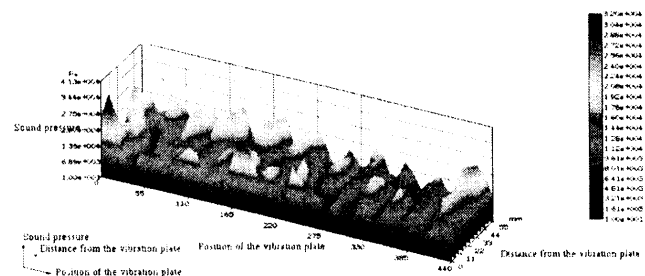


Fig.16 Distribution of the sound pressure in water (Traveling wave, 3 Dimension)

6. 結論

今回、定在波源の代わりに進行波源を用いた振動システムを試作し、それを水中において駆動した時の水中での音圧分布を、定在波源と進行波源の場合とで比較することにより、その両者の違いを考察したが、進行波源を用いた場合の方が音圧の不均一性が軽減されることが分かった。しかしながら、進行波源を用いた場合においても音圧の不均一性が存在することには変わりない。これは、試作した振動システムの進行波源が、完全な進行波を励振することができない、つまり、励振した進行波には、定在波成分が含まれているという点が原因の一つと考えられる。完全な進行波の場合は SWR は 1 となるが、今回の振動システムでは SWR は 2 である。振動システムの改善を含め、更なる、研究が求められる。

参考文献

- 1) 安藤英一, 加川幸雄: 超音波洗浄槽設計のための有限要素シミュレーション, 電子情報通信学会論文誌, A, Vol.J71-A, No.5, (1988), p.1079~1090.
- 2) 野村信福, 中川勝文: 超音波音場解析によるキャビテーション強度の予測, 日本音響学会誌 52, 8, (1996), p.592~598.
- 3) G.Servant, J.L.Laborde, A.Hita, J.P.Caltagirone, A. Gerard: Spatio-temporal dynamics of cavitation bubble clouds in a low frequency reactor: comparison between theoretical and experimental results, Ultrasonic Sonochemistry 8, (2001), p.163~174.
- 4) 黒澤 実: 複合振動子型超音波モータに関する研究, 東京工業大学, 博士論文, (1989), p.11~20.
- 5) CAD/CAE 研究会編: ANSYS 工学解析入門, 理工学社, (2001).