

水浸超音波探触子が作る入射波動場に関する実験と解析

○東京工業大学 学生会員 木村 勇太

東京工業大学 正 員 木本 和志

東京工業大学 正 員 廣瀬 壮一

1. はじめに

水浸探触子からの入射波動場の予測には、探触子表面の速度分布と水中の圧力場の関係を与えるレイリーの式が用いられる。その際、探触子の表面速度は空間的に様なものと仮定するピストンモデルを用いるのが一般的である¹⁾。この式は計算が容易で、高周波域あるいは遠方場では入射波動場を精度よく予測できる。しかしながら、観測点が探触子表面に比較的近い場合には予測精度が悪化することがあり、その一つの原因として探触子表面の二次元的な振動に起因するヘッド波の影響が指摘されている²⁾³⁾。そのため、商用探触子の使用に際しても、正確な入射波動場の情報が必要な場合には、ヘッド波の有無や影響について調べることが望ましい。本研究はそのための一手法を提案するものであり、水浸探触子からの放射圧力場を実験および数値計算を用いて解析する手法について述べたものである。以下では、実験方法およびいくつかの典型的な測定結果を示し、測定結果を元に、任意位置、時刻における圧力場を数値計算により求める方法について示す。

2. ハイドロホンを用いた圧力場計測

実験概要

実験概要図を図-1 に示す。超音波の送信には有効直径 13mm、中心周波数 2.25MHz の商用水浸探触子 (V306, PANAMETRICS) を用い、Square wave pulser (RITEC SP-801) によって幅 $T_{in} = 0.35\mu s$ 、振幅 400V の矩形パルスを入力した。受信には有効直径 0.5mm の needle hydrophone (NH7024, TORAY Techno) を用い、観測点は探触子面に対して図-2 のように配置した。図中の点線で示した各線分上には 81 点の観測点が等間隔に置かれている。送受信センサーの相対的な位置決めは、音場が x 軸上に関して対称であるものとして仮定し、送信探触子のエッジ波が同時刻に到達する点を三点検索して x 軸と仮定することで行った。

実験結果

$(x, r) = (20, 0), (10, 2), (5, 0)mm$ の 3 点で得られた結果を図-3(a),(b),(c) に点線で示す。図中には縦の実線で直達波、エッジ波の到達時間が示してある。さらに、それらの二つの波が時間的に明瞭に分離される場合にはそれぞれを丸で囲んで明示してある。(a) では直達波とエッジ波は分

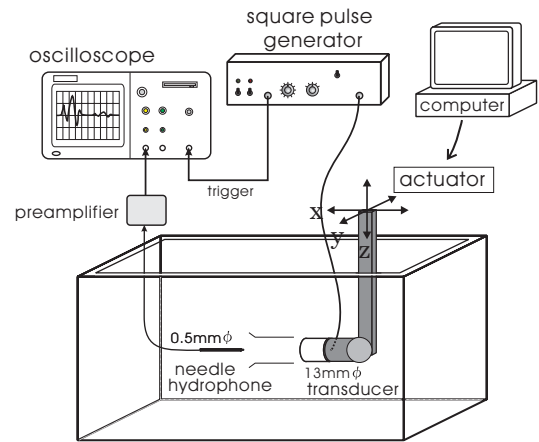


図-1 実験装置

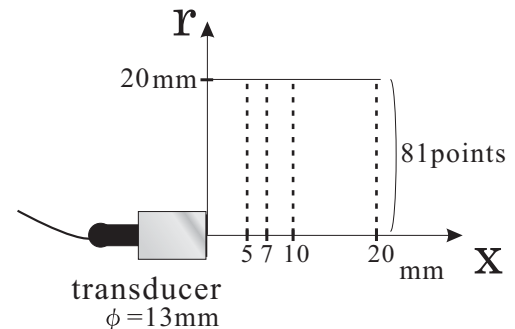


図-2 観測点と座標系

離されていないが、観測点が探触子面に近い(c)のケースではお互いにはっきりと分かれている様子が見られる。さらに両者の間には無視できない大きさの振幅を持ったヘッド波も現れていることがわかる。

3. 解析手法

計測により得られるのは圧力の時刻歴波形であるが、圧力波の空間分布やその進展を見るには、空間的な波形として計測結果を示すのが分かり易い。しかし、そのために必要なデータを全て計測するのは効率的ではなくまた保存しておくべきデータ量も膨大なものになってしまう。そこでここでは図-2 に示した線分のうち一つを選び、そこで行った観測結果から任意の位置、任意の時刻での圧力を計算により求める方法を示す。このような方法は実験に必要な労力を軽減するばかりでなく、センサーの指向性や、センサーの間の多重反射により測定が困難となる探触子近傍の圧力場を、より遠方でのデータから求めることを可能とする利点がある。

Key Words: ヘッド波, レイリーの式, 水浸超音波探触子, 入射波動場, 有限差分法

〒152-8552 東京都目黒区大岡山 1-12-1 TEL/FAX 03-5734-2692 URL <http://www.cv.titech.ac.jp/~hiro-lab>

定式化

円形探触子を作る波動場が x 軸に関して対称であると仮定すれば圧力音場は波速を c として次の波動方程式を満足する。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

これに適当な初期条件、境界条件を与えて解くことができれば任意の (x, r, t) における圧力を与えることができる。ここでは、初期条件を $p(r, x, t)|_{t=0} = \dot{p}(r, x, t)|_{t=0} = 0$ で与え、境界条件は、ある $x = c$ で計測したデータを $p(x, r, t)|_{x=c}$ として用いることで与える。ただし、以下の解析において c は 5, 7, 10, 20mm のいずれかである。式 (1) の数値解を求める際には、対称性を考慮して r 座標に関するハンケル変換をとり、変換域で差分法を用いる。変換域での支配方程式は

$$\frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial x^2} - \xi^2 \bar{p} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial t^2} \quad (2)$$

であり、ここに ξ は変換パラメータを、 $(\bar{\cdot})$ で変換域での量であることを意味する。式 (2) を差分近似して整理すると、

$$\bar{p}_k^{i+1} = \left(\frac{\bar{p}_{k+1}^i - 2\bar{p}_k^i + \bar{p}_{k-1}^i}{\Delta x^2} - \xi^2 \bar{p}_k^i \right) c^2 \Delta t^2 + 2\bar{p}_k^i - \bar{p}_k^{i-1}, \quad (i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, \dots). \quad (3)$$

となる。ここに、 $\bar{p}_j^i = \bar{p}(c + c\Delta x, \xi, j\Delta t)$ である。式 (3) を解くことで任意点での変換域での圧力 $\bar{p}(r, x, t)$ が求まり、さらにその結果を逆変換すれば求めるべき $p(r, x, t)$ が得られる。

4. 解析結果

式 (3) を用いて行った解析結果を図-3 に実線で示す。解析に用いたパラメータは $\Delta t = 0.02 [\mu\text{sec}]$, $c = 1472 [\text{m/sec}]$, $\Delta x = 1.1c\Delta t$ であり、ハンケル変換パラメータ ξ の範囲は、観測波形を十分な精度で表現できるように $\xi_{\max} = 2\pi/cT_{in}$ とした。(a),(b),(c) に示した波形の計算には、それぞれ $x = 5, 5, 20\text{mm}$ において行った計測結果を用いた。(c) のケースでは、差分法による解析を時間ステップを過去に遡る形で行うことで観測波形を逆伝播させて求めている。これらの図では、実験結果と解析結果の若干の相違は見られるものの、振幅の大きな部分はおおむね一致しており本手法の有用性を示している。図-4 に $x=7\text{mm}$ の線分上で測定した波形を用い計算した $t = 9.0\mu\text{sec}$ における空間波形を示す。この図はグレースケールで圧力の振幅を表しており、直達波、エッジ波、ヘッド波などの波面位置を実線で示してある。空間マップはこのように波面パターンが視覚的に理解しやすく、場がどのように進展するかを理解するツールとして有効である。

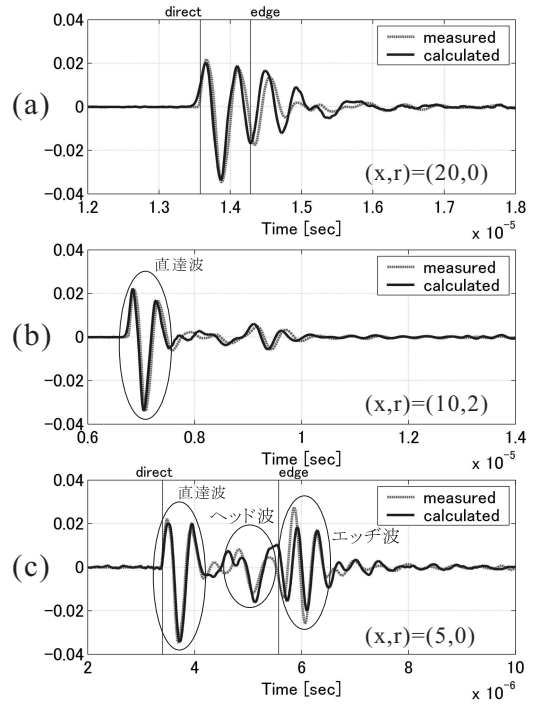


図-3 圧力波の時刻暦波形. 計測結果 (実線), 計算結果 (点線).

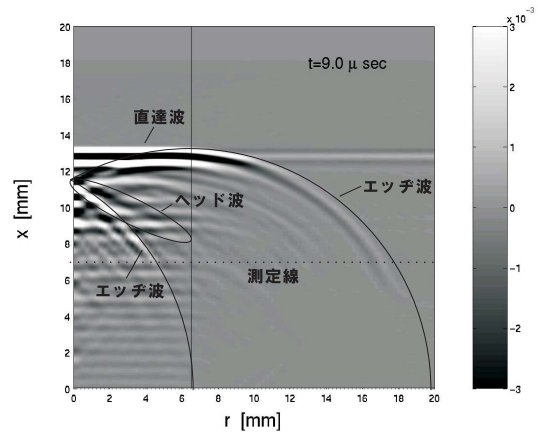


図-4 入射波動場. $x=7\text{mm}$ で測定された波形から計算.

5. まとめ

本研究では、水浸超音波探触子からの入射波動場を実験および数値解析により調べる方法を示した。特に探触子面近傍の領域に着目して検討を行った結果、探触子軸付近ではヘッド波が比較的大きな振幅を持っていることが分かった。今後はヘッド波の影響を考慮した入射波動場モデルを考案することが課題であると考えられる。

参考文献

- Schmerr, L. W., *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, Plenum Press, New York (1998).
- Cathignol, D., Sapozhnikov, O. A. and Zhang, J., Lamb waves in piezoelectric focused radiator as a reason for discrepancy between O'Neil's formula and experiment, *J. Acoust. Soc. Am.*, 101, 1286-1297 (1996).
- Jia, X., Berger, J. and Quentin, G., Experimental investigations of Lamb waves on pulsed piezoelectric transducers and their ultrasonic radiation into liquids, *J. Acoust. Soc. Am.*, 90, 1181-1183 (1991).