

シュリーレン法による音場可視化を用いた放射圧集束の検討

辻内 亨、小塚 晃透、三留 秀人（工技院・名工研）

1. はじめに

著者らは超音波噴水を用いて、凹面型超音波振動子による音響放射圧の集束についての検討を行ってきた¹⁾。この結果、中心軸の軸方向における力の作用範囲を制御するには、振動子の共振周波数、焦点距離、投入電力の適切な選択により可能であることが分かった。このことは中心軸上の音圧振幅の理論値を用いて定性的に説明できるが、実験的には焦点より振動子側での力の作用範囲の伸びがうまく説明できない。超音波噴水として現れる音響放射圧は面に作用するため、中心軸以外の音圧振幅についても考慮しなければならないことを示している。本報では、超音波の光学的映像法の一つであるシュリーレン法を用いて、水中に置かれた凹面型振動子によって発生する音場を可視化し、超音波噴水で観察した音響放射圧の集束について、検討を行う。

2. 超音波噴水と放射圧の集束

超音波噴水の実験の概要を図1に示す。水槽中に凹面型振動子を上向きに取り付け、連続正弦波を放射する。振動子の焦点が水面近くにあれば、ある程度以上の投入電力があれば、水面から細い噴水が発生する。振動子は3軸のトラバース装置の上下方向に移動する軸に固定されている。振動子への投入電力を一定に保ったまま振動子を上下に動かすと、ある範囲を越えると噴水は発生しなくなる。図2は5.60 MHzで焦点距離40 mmの振動子を用いた場合の噴水発生範囲を示すもので、上方で噴水が出なくなる点および、下方で出なくなる点をそれぞれ near および far で示す。投入電力を増すと噴水発生範囲も増すが、この傾向については、進行波音場における中心軸上の音圧振幅分布の理論値（図3）によって、その焦点付近にある音圧の最大ピークで説明できる。ある投入電力の時、水の表面張力に抗して噴水が発生するのに必要な放射圧を生じさせる音圧振幅をもつ範囲で噴水は発生するが、投入電力を増加させると音圧振幅は増大し、これに伴って噴水発生範囲は増大する。しかし、噴水発生範囲の振動子が水面に近づく側での伸びが、水面から離れる側での伸びより大きくなることは、図3からは説明できない。これは水面からの反射波や中心軸以外での音圧振幅を考慮に入れていないためと考えられる。

3. シュリーレン法による音場の可視化

このことを検討するために、シュリーレン法を用いて集束音場の可視化を行った（図4）²⁾。振動子は超音波噴水の実験と同じ、共振周波数5.60 MHz、焦点距離40 mm、直径20 mmのものを外径30 mmのケースにシリコンゴムで固定して用いた。光源には高圧水銀灯

を用い、凹面鏡で平行光線にして水槽中の超音波音場を通過させ、さらにもう一方の凹面鏡で集光する。ナイフエッジで超音波の影響を受けない0次光を遮ることにより、音場が可視化される。

図5は種々の投入電力における集束振動子による進行波音場の可視化像を示す。この図から凹面振動子により音場がシャープに集束されている様子がわかる。また、投入電力が増加すると焦点近傍においても音圧の高い領域が増え、これによる噴水発生範囲の増加と対応させて考えることができる。しかしながら、超音波噴水は媒質の音響インピーダンスと大きく異なる水面への超音波の放射であるから、反射波の影響も考慮しなければならない。このために、焦点位置と反射板位置との関係で、反射波の影響が音場にどのような影響を与えるかを示したのが図6のシュリーレン像である。ただし、反射板には鉄製のブロックを用いているので、音響インピーダンスの関係は水面の場合とは逆である。図より、反射波の影響が出ているのが明らかである。

4. 超音波噴水の発生する音場

次に、実際に超音波噴水の実験を行った音場をシュリーレン法により可視化した。振動子の送波面を上向きにし、振動子への投入電力を1Wとし、振動子と水面との距離を変えていった(図7)。(a)が振動子と水面の距離が一番近い場合で、(c)が水面に焦点がある場合、(e)が水面から一番遠い場合である。(a)-(c)と(c)-(e)では振動子はほぼ同じ距離動いているが、可視化された音場を比較すると水面に近づく側の方が強くなっており、噴水発生範囲が水面に近づく側で大きくなる現象とよく対応していることがわかる。

5. 結論

シュリーレン法を用いて水中に置かれた凹面型振動子による音場の可視化を行い、放射圧の集束との対応について検討を行った。

超音波噴水における噴水発生範囲の、水面に近づく側での伸びが水面から離れる側での伸びより大きいことは、軸上の進行波の音圧振幅分布だけからでは説明できなかったが、シュリーレン法による音場の可視化の結果、水面からの反射、さらには面としての力の作用範囲の広がりによって上記の現象が起きていることが分かった。

音響放射圧を用いれば非接触で物体等に力を作用させることができ、さらに集束音場を用いれば微小な領域にその作用範囲を限定することができる。音響放射圧による力の大きさの制御、作用範囲の制御により、マイクロマシンやマイクロマニピュレーション等、種々の分野へ応用が展開されていくものと期待される。

参考文献

- 1) 辻内、小塚、三留：凹面型超音波振動子による音響放射圧の集束、日本音響学会講演論文集、p. 1011、1994. 3
- 2) 根岸、高木：「超音波技術」、(東京大学出版会、1984) pp. 76-100

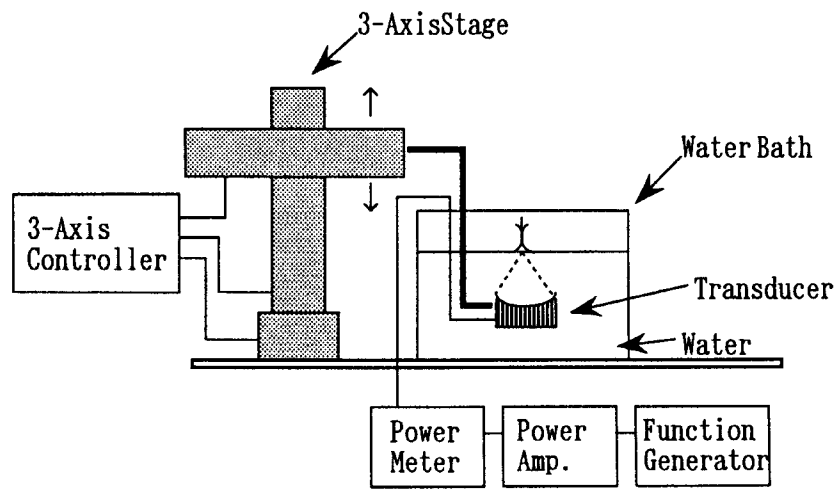


図1. 超音波噴水実験装置

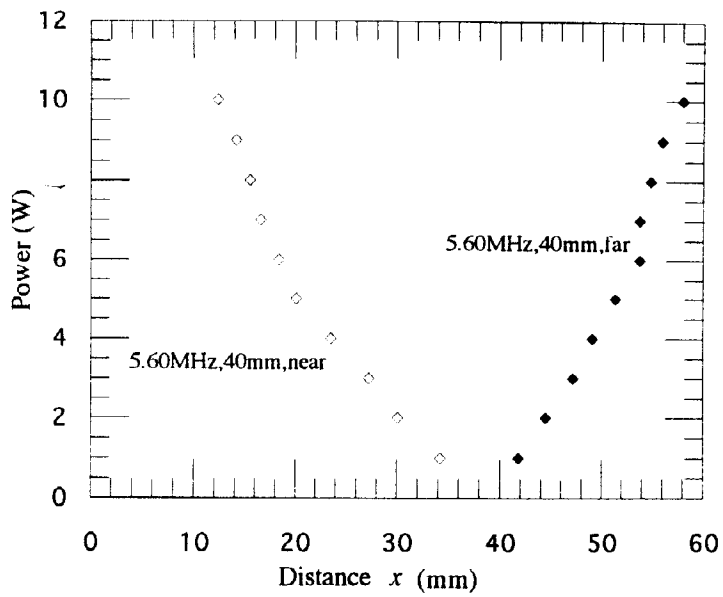


図2. 噴水発生範囲

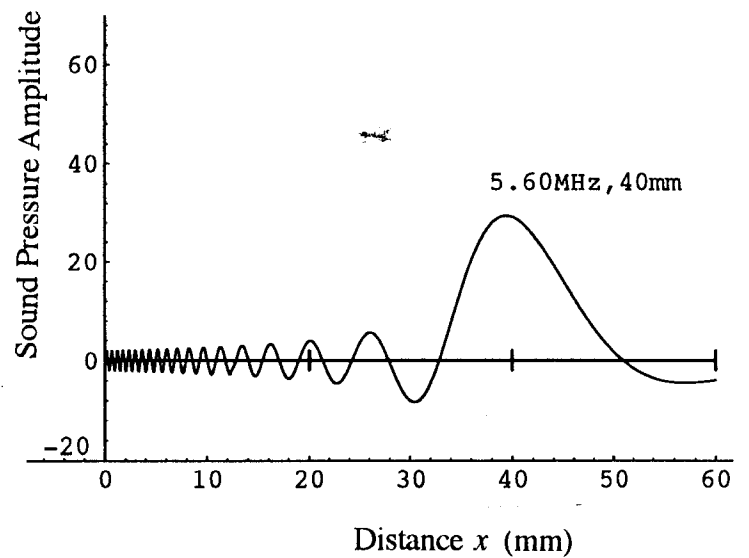


図3. 進行波音場における中心軸上の音圧振幅分布の理論値

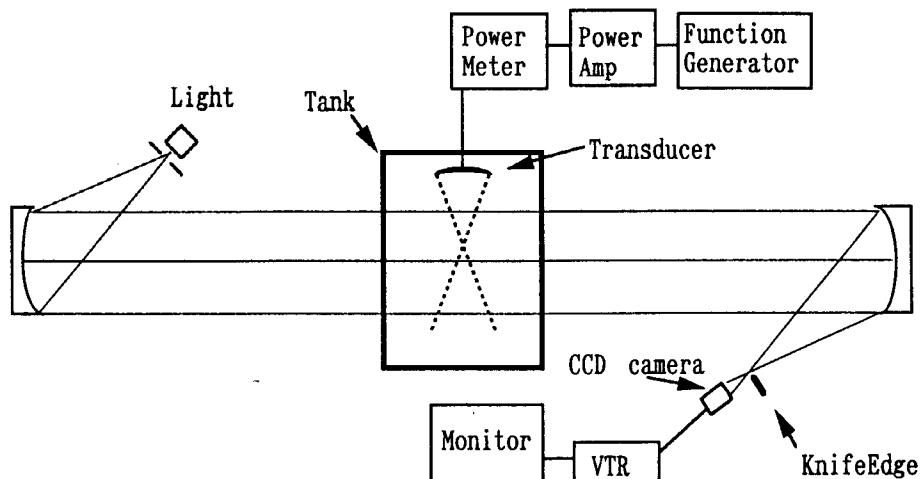
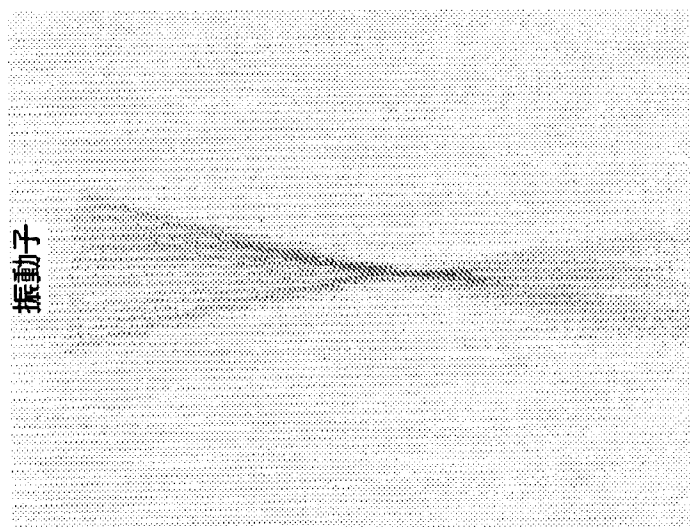
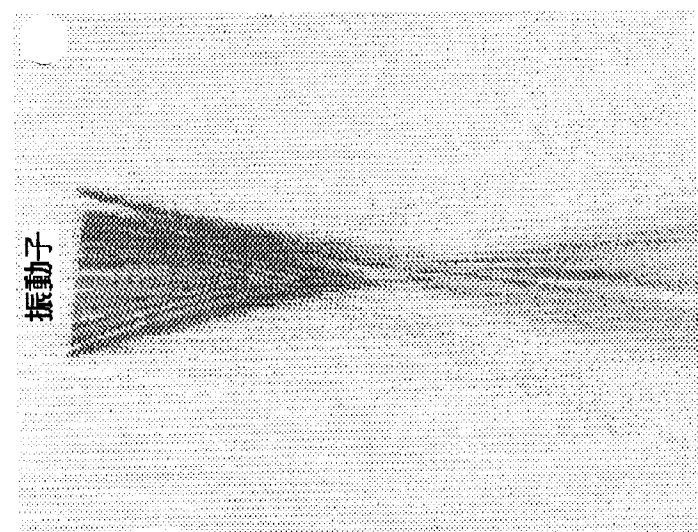


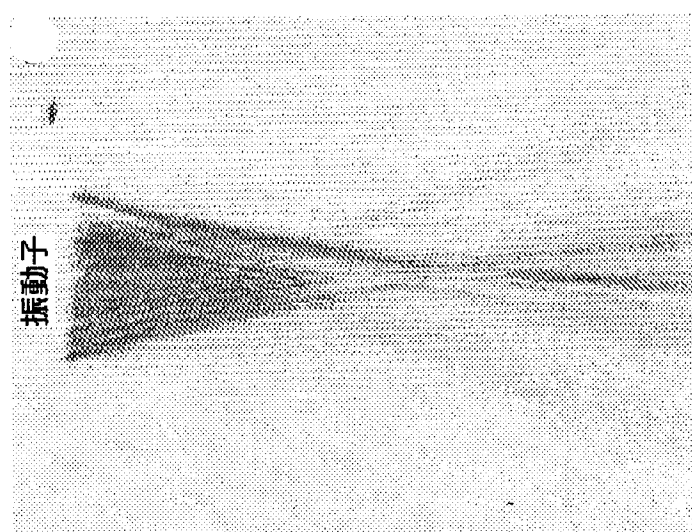
図4. シュリーレン法



(a) 1 W

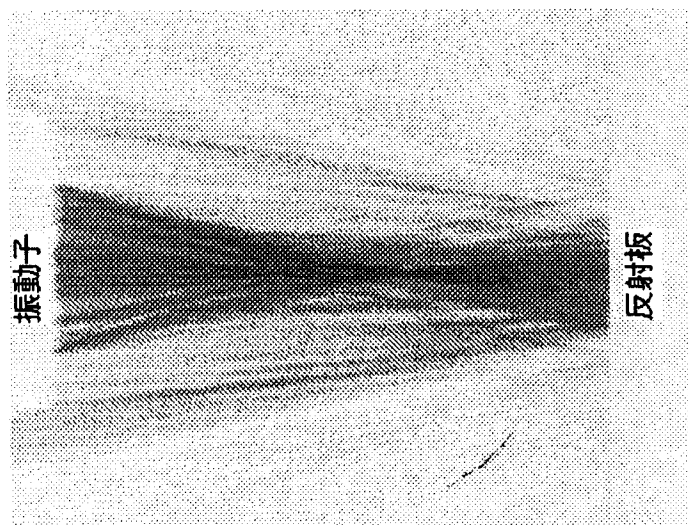


(b) 5 W

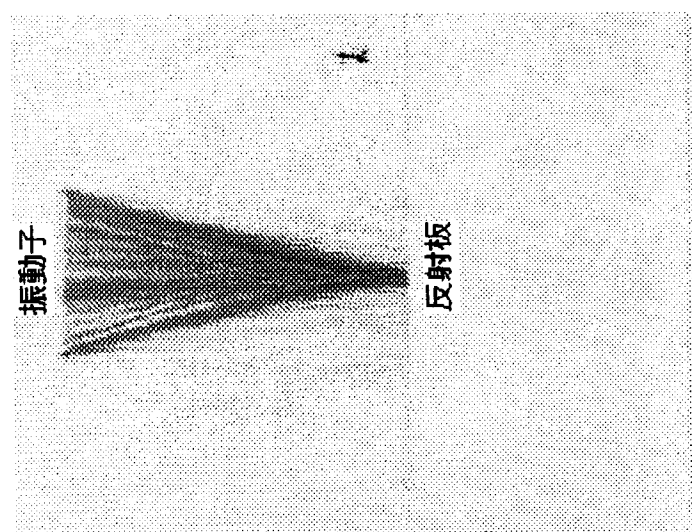


(c) 10 W

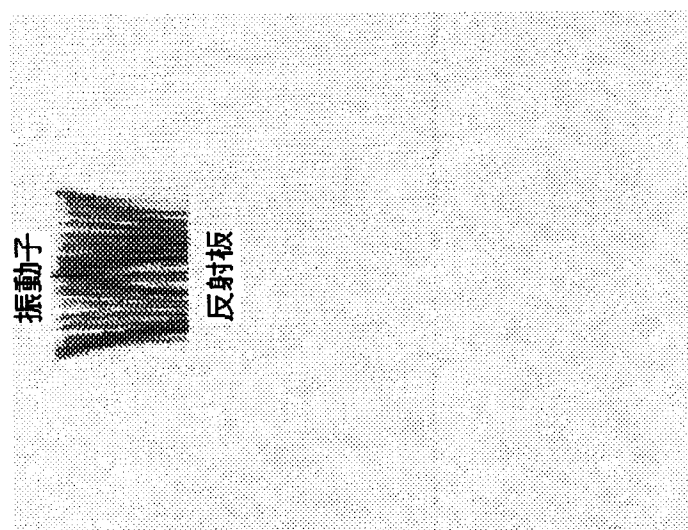
図5. 集束型振動子に与える電力変化によるシュリーレン像の変化 (白黒反転)



(a) 反射板位置 > 焦点位置

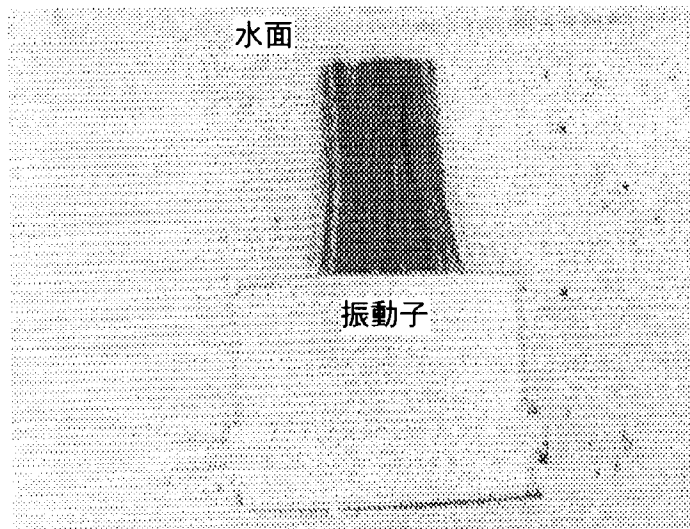


(b) 反射板位置 = 焦点位置

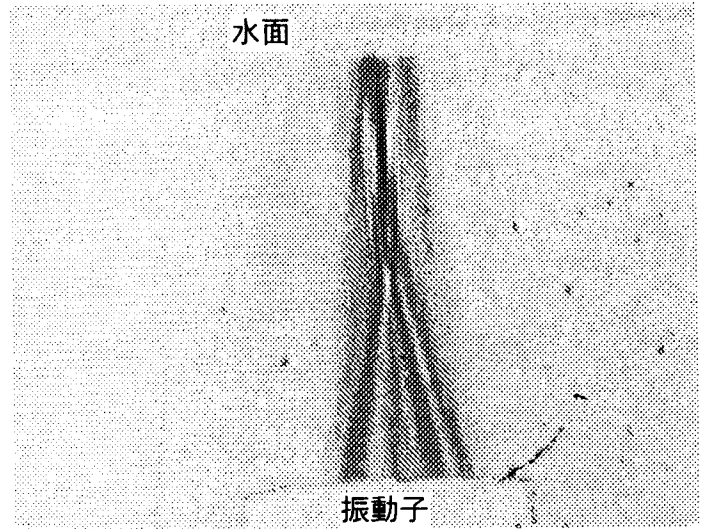


(c) 反射板位置 < 焦点位置

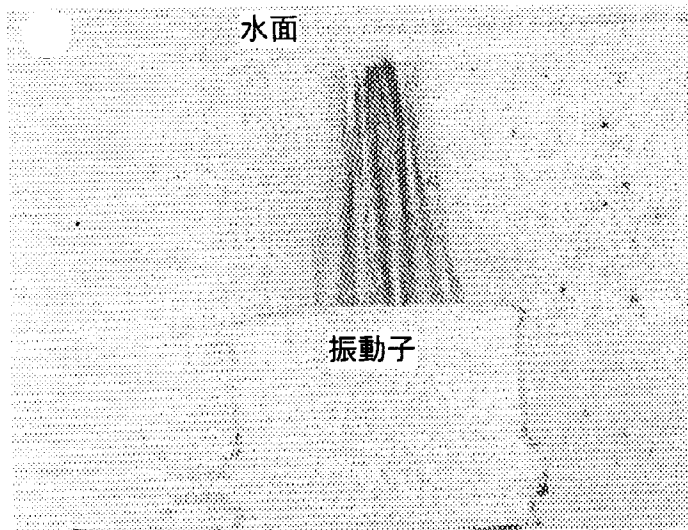
図6. 集束型振動子前方に反射板を設置した際の位置によるシュリーレン像変化 (投入電力は 1 W, 白黒反転)



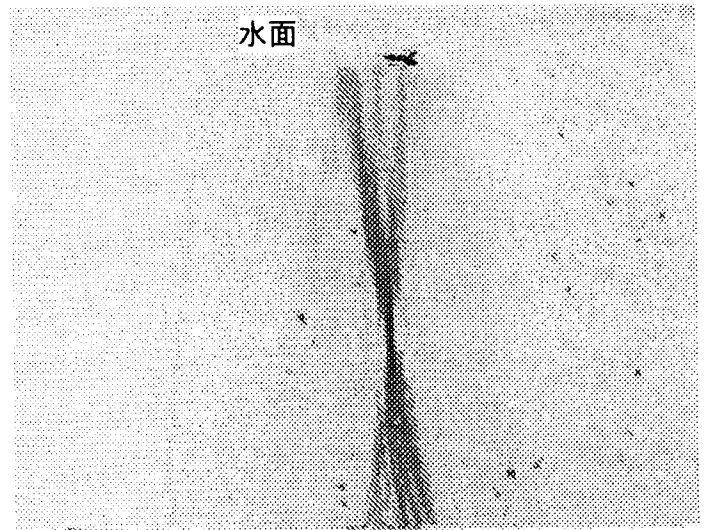
(a)



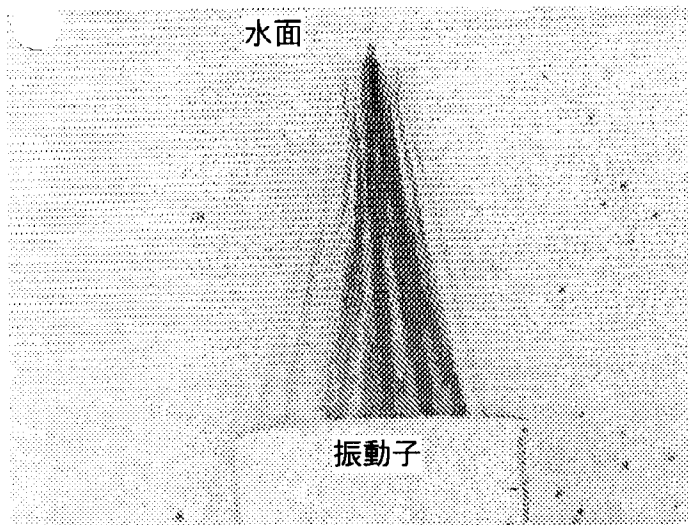
(d)



(b)



(e)



(c)

図7. 振動子-水面間の距離を変化した際のシュリーレン像
(白黒反転)