

線集束型振動子を用いた二次元超音波マニピュレーション

通商産業省 工業技術院 名古屋工業技術研究所

小塚 晃透、辻内 亨、三留 秀人

1. 緒言

マイクロマシンの研究開発において、微小物体を非接触で操作する技術が求められている[1]。また、新材料開発の基礎となる原料微粉体のフィルタリングには、微粉体をその特性に応じて選別する非接触ハンドリング技術が必要である。非接触で力を作用させるには静電力[2]やレーザー光の放射圧[3]が多く用いられているが、超音波の音響放射圧を用いることも可能であり[4,5]、いくつかの研究がある[6,7]。筆者らはこれまで流体中を進む超音波の音響放射圧に関する非線形音響の研究を行ってきた[8,9]。

水中に生成された定在波音場中に、波長に比べて十分に小さな微粒子を懸濁液にして注入すると、媒質より密度の高い粒子は音場中に半波長間隔で存在する音圧の節に捕捉される。音場を変化することで捕捉した粒子を移動することが可能であるが、振動子に平面型を用いた場合、音場が振動子と平行な方向に広がるため、周波数を変化することによる音軸上の位置制御は困難である。しかし、凹面型振動子とその焦点位置に反射板を設置して生成される定在波音場中では、音圧の高い領域が反射板近傍の音軸上に集中するため、粒子を音軸上で一次元的に捕捉することが可能であった。この状態で、周波数を変化すると波長が変わり、それに伴って音圧の節の位置も変わるため、粒子の一次元位置制御が可能であった[8]。

また、矩形振動子を用いて裏面電極を短冊状に分割すると、電圧を印加する電極を切り替えることで、音源を電氣的に平行移動することが可能である。この振動子と反射板を用いて定在波音場を生成すると、音圧の節に捕捉した粒子を音軸と垂直方向へ移動することが可能であった[9]。

今回は上記2手法を組み合わせることで二次元マニピュレーションを試みる。

2. 実験

2.1 線集束型振動子

定在波音場の音圧の節に捕捉した微粒子を、周波数を変化することで音軸上を移動するためには、音波を集束させる必要がある。また、音場を平行に移動するためには電極を短冊状に分割する必要がある。そこで、裏面電極を短冊状に分割した線集束型振動子を用いた。図1に振動子および座標系を示す。振動子の寸法は、 $20 \times 40 \text{ mm}$ 、曲率半径 40 mm 、裏面電極の寸法 $20 \times 2 \text{ mm}$ 、電極の間隔 0.5 mm 、電極数15である。

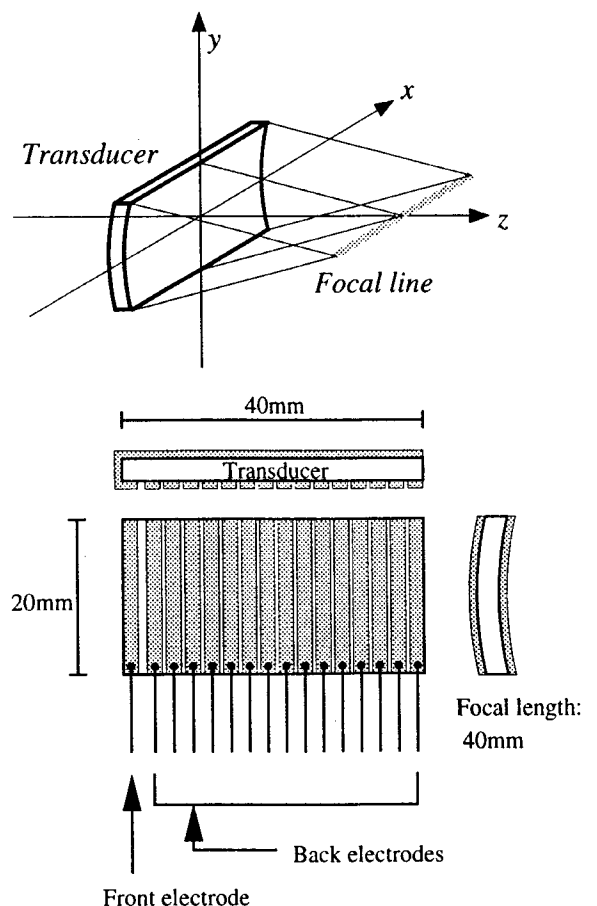


FIG. 1. A line-focused transducer.

振動子の長辺方向（曲率なし）を x 軸、短辺方向（曲率あり）を y 軸、振動子の中心に垂直な方向（音波の伝搬方向）を z 軸、振動子面の中心を原点とする。

線集束型振動子は円筒の一部分であり、幾何学的な焦点は、円筒の中心線上に一次元的に広がる。光学的可視化法であるシュリーレン法を用いて観察した音場を図2に示す（駆動電極は連続3電極、 $7 \times 20\text{mm}$ ）。 y - z 面については幾何学的な焦点位置に向かって超音波は集束するが、 x - z 面については振動子からの距離と共に超音波は緩やかに広がっていくことがわかる。

振動子の周波数特性を調べるために、ハイドロホンを音場中の焦点付近に固定して、振動子から放射される進行波の音圧を測定した。アンプの定格利得は50dBであるが、周波数の変化に伴い振動子のインピーダンスが変化するので、アンプの利得は周波数によって変動する。そこで、振動子の印加電圧をデジタルオシロスコープで測定し、振動子印加電圧が 20V_{pp} の一定値となるようにファンクションジェネレータの出力電圧を調整して測定を行った。結果を図3に示す。音圧は共振周波数 2.1MHz の時を最大として、周波数が共振周波数から離れると共に低下することがわかる。振動子の印加電圧が異なると音圧は異なるが、周波数による特性の変化はほぼ同様であった。

2.2 実験装置

図4に実験装置を示す。水中で振動子を上向きに固定し、その上方約 40mm （焦点距離）の位置に振動子と平行に反射板を設置した。ファンクションジェネレータ（岩通製SG-4511）により生成された 2.1MHz の正弦波交流を、50dBのアンプ（ENI製325LA）で増幅し、スイッチにより選択された駆動電極に供給する。スイッチング回路はコンピュータ（NEC製PC-9801）により制御され、ファンクションジェネレータの周波数、出力電圧等もコンピュータにより制御される。振動子に加わる電圧はデジタルオシロスコープ（横河電機製DL-1540）で計測し、コンピュータに送られる。なお、コンピュータ、ファンクションジェネレータとデジタルオシロスコープはGP-IBインタフェースで接続した。

連続した3電極に 20V_{pp} の電圧を印加して生成した定在波音場中に、平均径 $16\mu\text{m}$ のアルミナ微粒子の懸濁液を投入したところ、粒子は音軸上に半波長間隔で存在する音圧の節に捕捉され凝集した。図5に反射板近傍に捕捉された粒子を、 x - z 面および y - z 面について観察した写真を示す。一次元的に伸びる焦点の形状を反映した、細長い棒状に凝集している様子がわかる。

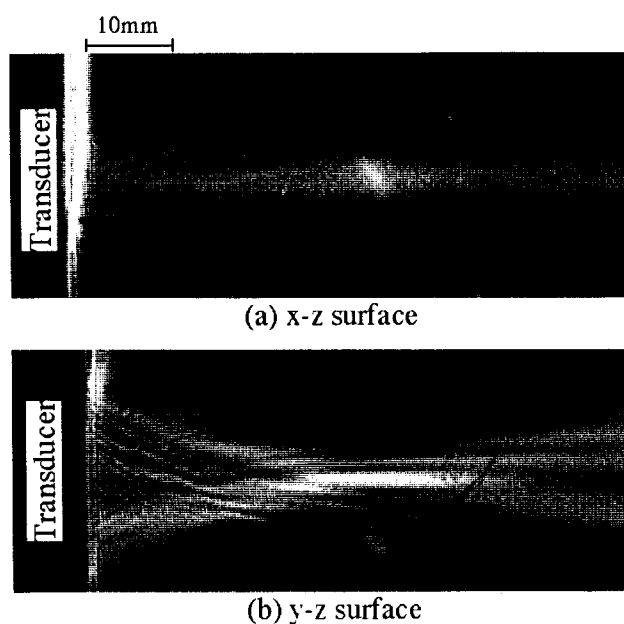


FIG. 2. Schlieren images of a sound field generated by the line-focused transducer.

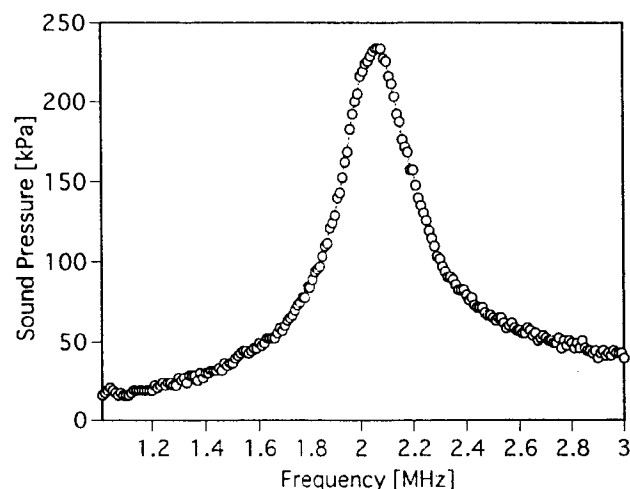


FIG. 3. Frequency characteristics of the transducer.

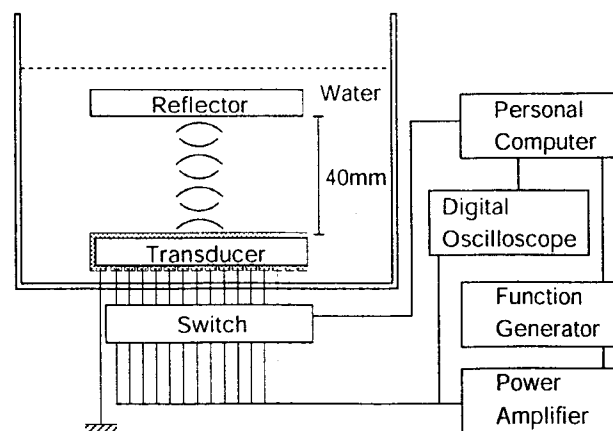


FIG. 4. Experimental apparatus.

2.3 周波数変化による音軸上（z軸）での粒子移動

図3に示したように、周波数が共振周波数から離れると共に進行波音場中で得られる音圧は低下するが、たとえば焦点付近で100kPa以上の音圧を必要とする際に、1.9MHz～2.3MHzの間で周波数を変化することは可能である。周波数を変化すると波長が変化するので定在波の音圧の節が移動し、音圧の節に捕捉した微小物体も移動する。定在波音場中では、音圧の節は半波長（ $\lambda/2$ ）毎に生成されるが、1.9MHzにおいては $\lambda/2=0.39\text{mm}$ であり、2.3MHzでは $\lambda/2=0.33\text{mm}$ となる。周波数変化による音圧の節の移動距離は反射板からの距離により異なるが、たとえば反射板から約5mm離れたところにある音圧の節は、周波数を1.9MHz～2.3MHzまで変化した際に約1mmの距離を移動することになる。

さて、粒子を長い距離に渡って移動する方法について検討する（図6）。周波数を徐々に変化することで、音圧の節に捕捉した粒子を移動することができるが、周波数を急激に変化させると粒子は音圧の節の移動に追従しなくなり、近傍の音圧の節に移動する。すなわち、周波数 f で粒子を捕捉し（図6(a)）、周波数を徐々に変化して捕捉粒子を移動した（同(a)→(b)→(c)）後、周波数を瞬時に初期値に戻す（同(d)）と、周波数は初期値と同じ状態で、粒子を移動することが可能となる。そして再び周波数を徐々に変化して急に初期値に戻す、この一連の操作を繰り返す行うことで、捕捉粒子を長い距離について移動することが可能となる[10,11]。

周波数の繰り返し変化による捕捉粒子の長距離移動の実験を行ったところ、周波数を初期値に戻す際に、粒子の位置と音圧の節の位置が比較的離れているため、捕捉が困難であることがわかった。周波数を大きく変化する際には、強力な力で粒子を捕捉することが必要であると考えられる。そこで周波数の初期値として最も強い音圧を得ることのできる共振周波数を用いたところ、安定した移動が可能であった。

2.4 電極制御による水平方向（x軸）の粒子移動

粒子を音圧の節に安定して捕捉するためには、連続した複数の電極を駆動することが必要である。x軸方向に広がる音源により、x軸に関しては平面波に近い音場が生成されると考えられる。また、音場を滑らかに移動させるためには、移動する際に音場が重なり合う部分が必要と考えられ、電極を1極毎に順次切り替えることが望ましい。なお、その際の音場の移動の分解能は1電極の大きさとなる。駆動電極数を変えて粒子移動実験を

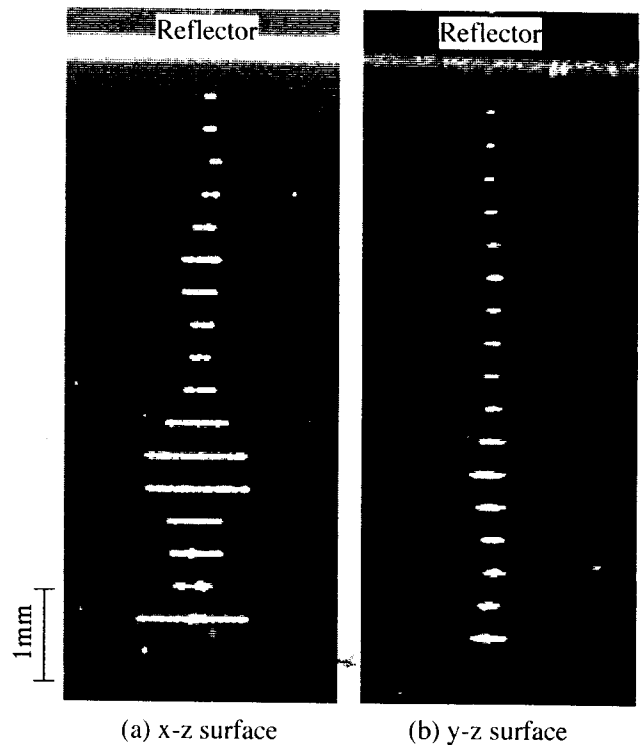


FIG. 5. Trapped particles in an ultrasonic standing wave field.

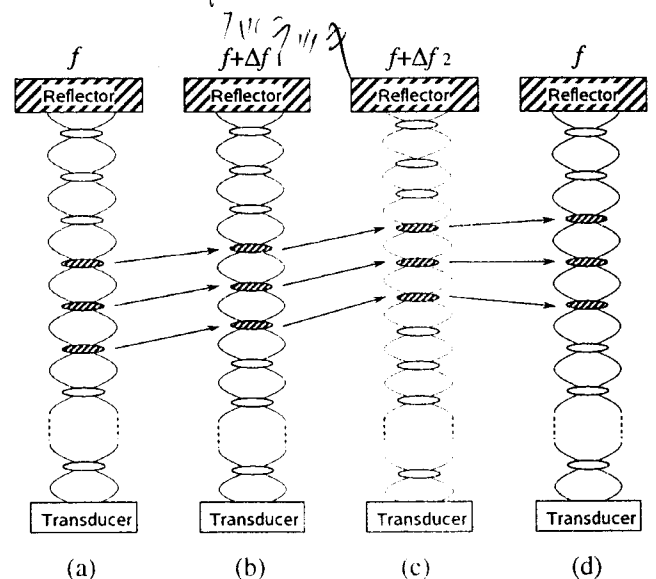


FIG. 6. Behavior of the particles when the frequency changes.

試みたところ、電極数が少ない場合、線音源に近くなり音波が広範囲に拡散するため、捕捉粒子は媒質の流動等により流されてしまい、電極切り替えの際に追従が困難であった。逆に電極数が多過ぎると、広範囲に平面波が広がり、多数の箇所粒子が捕捉されるため、捕捉位置を一点に特定できず、電極を切り替えても捕捉粒子が移動しないという現象が観察された。本実験においては、連続した3電極を駆動した際に、最も良好な微粒子操作が可能であった。

2.5 二次元マニピュレーション

周波数変化および電極切り替えを組み合わせた二次元マニピュレーションの実験を行った。周波数が共振周波数から離れている場合、音響放射圧による力が弱くなるため、電極切り替えによる水平方向の移動が困難であった。そこで、電極切り替えを行う際には、周波数を共振周波数にして行った。図7はx-z面から観察した実験結果の一例の多重露光写真である。まず第一に、連続した3電極を共振周波数2.1MHzで駆動して定在波音場を生成し、アルミナ粒子を音圧の節に捕捉した(左下)。次に、電極を2電極分右に移動した(右下)後、周波数を2.4MHzまで0.01MHz間隔で増加し、2.4MHzから2.1MHzに瞬時に切り替える操作を2回繰り返した(右上)。そして、電極を2電極分左へ移動した(左上)。実験はこの後、周波数を2.1MHz~1.8MHzまで減少する操作を2回行うことで捕捉粒子を最初の位置まで戻し、さらに何度でも同じ操作を繰り返すことで粒子を四角形に沿って移動することが可能であった。

3. 考察

今回の実験では安定した定在波音場を生成するために、連続した3電極を駆動した。本章では電極の数の影響を検討するために、進行波音場中の音圧分布を測定し、理論値と比較する。

3.1 ハイドロホンによる進行波の音圧分布の測定

振動子から放射される進行波の音圧は、ハイドロホンを用いて測定することができる。そこで直径1mmのPVDF/ハイドロホン(Medicoteknisk製)を音場中で三次元的に走査し、進行波音場中の三次元音圧分布を測定した。連続した3電極に2.1MHz、20Vppの電圧を印加して、1mm間隔で測定した。図8に、y=0mmにおけるx-z面、x=0mmにおけるy-z面、z=10mmから60mmまで10mm毎におけるx-y面についての測定結果を示す。振動子近傍では振動子の形状を反映した音圧分布が得られるが、振動子からの距離が離れると共に、曲率のあるy方向は焦点に向かって集束し、曲率のないx方向は緩やかに広がっている。

電極数による影響を調べるために電極数が1、3、5の場合について、音軸上(x=0mm, y=0mm, z=2~60mm)および振動子から40mmの距離におけるx軸(x=-15~15mm, y=0mm, z=40mm)、y軸(x=0mm, y=-15~15mm, z=40mm)において0.2mm間隔で測定した結果を図9に示す。音軸上に着目すると、1電極と3電極が非常に類似した結果となった。これは、電極を含む周辺部が振動するため、電極の幅が小さい場合、その違いが顕

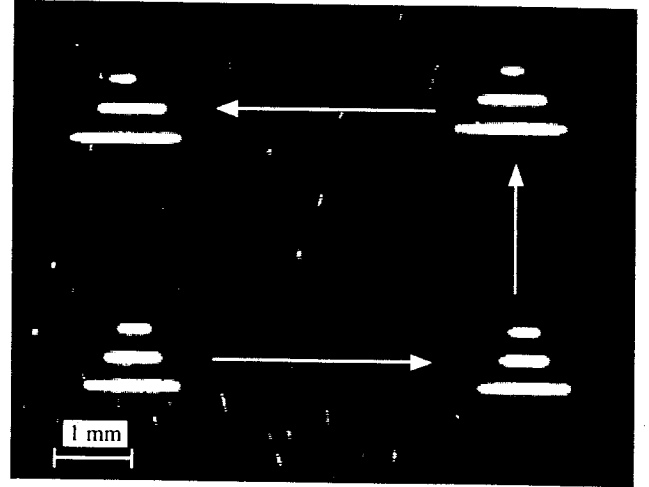


FIG. 7. Transported particles.

著に表れないためと考えられる。また、焦点位置での分布を見ると、5電極は電極の幅の方向(x方向)に音場が広がるため、3電極の場合に最大音圧が得られることがわかる。

3.2 Rayleighの式による音圧計算

音圧はRayleighによれば次式で表される。

$$p = j \frac{\rho c V_0}{\lambda} \exp(j\omega t) \iint_F \frac{\exp(-jkr)}{r} dF \quad (1)$$

ここで、 V_0 は音源音圧、 ρ は媒質の密度、 c は媒質中の音速、 λ は媒質中の波長、 ω は媒質中の角周波数、 $k = \omega/c$ 、 r は観測点から振動子上の任意の点

までの距離である。このうち $j \frac{\rho c V_0}{\lambda} \exp(j\omega t)$ は、時間 t に関する変動分であるの

で、 $\iint_F \frac{\exp(-jkr)}{r} dF$ について計算を行う。振動子寸法 $2a \times 2b$ 、曲率半径 R の振動子から放射される音圧 p は時間 t の変動分を A とおくと、観測点 (x_0, y_0, z_0) において、次式で表される。

$$p = AR \int_{-\theta}^{\theta} \int_{-b}^b \frac{\exp(-jkr)}{r} d\varphi dl \quad (2)$$

$$r = \sqrt{(x_0 - l)^2 + (y_0 - R \sin \varphi)^2 + (z_0 - (R - R \cos \varphi))^2} \quad (3)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{a}{R}\right) \quad (4)$$

図10は、 7×20 mm (3電極相当)、 $R=40$ mmの音源から放射される音圧を、図8に示す音圧分布

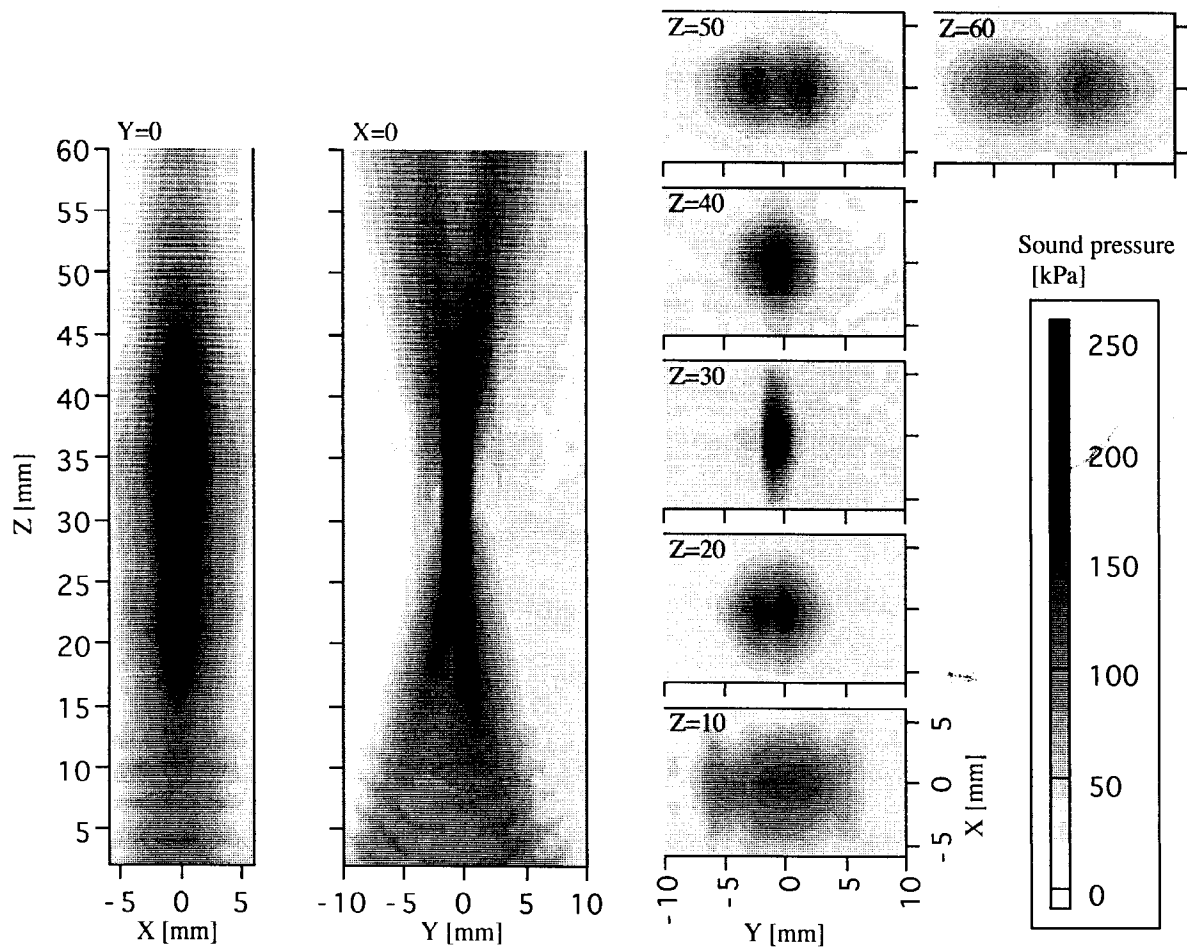


FIG. 8. Measured distribution of sound pressure in a progressive sound field.

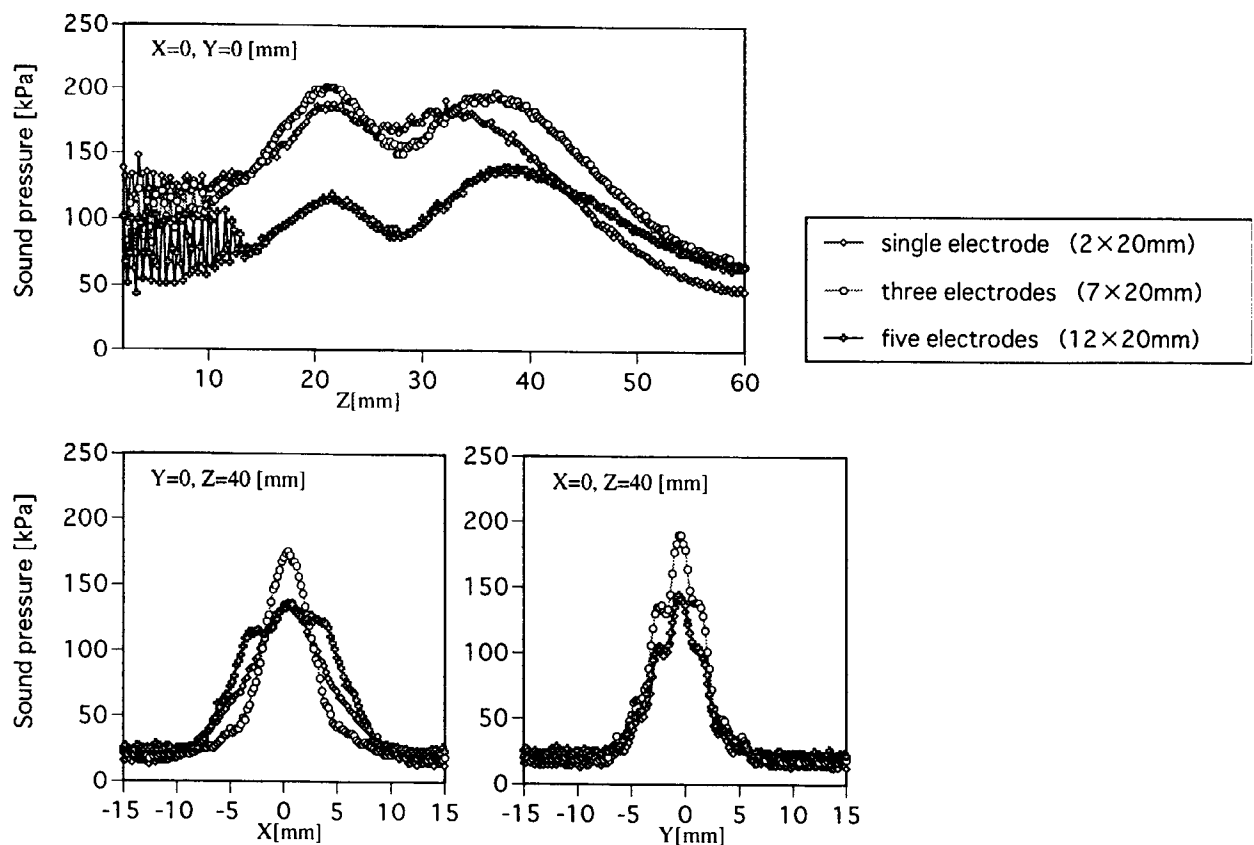


FIG. 9. Measured distribution of sound pressure along the axes.

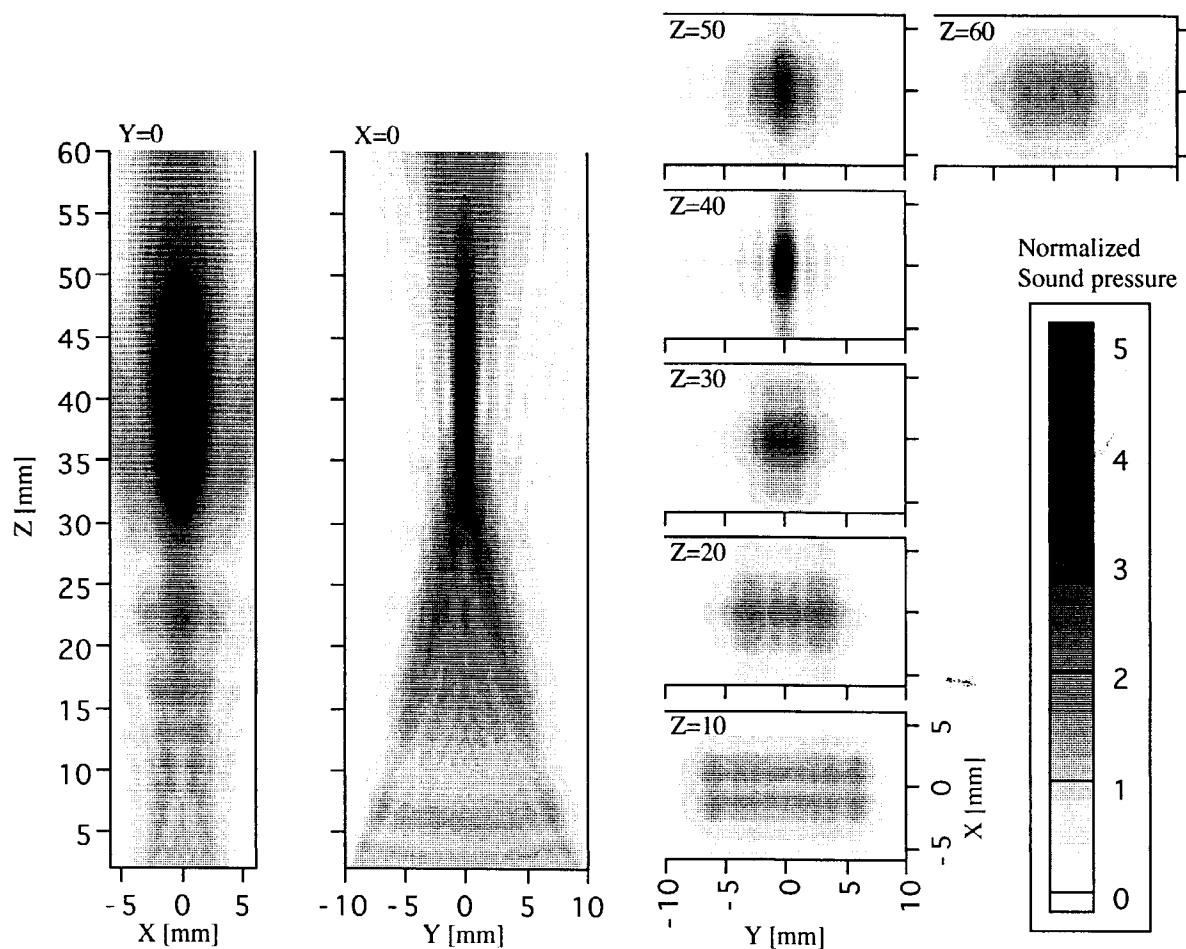


FIG. 10. Calculated distribution of sound pressure in a progressive sound field.

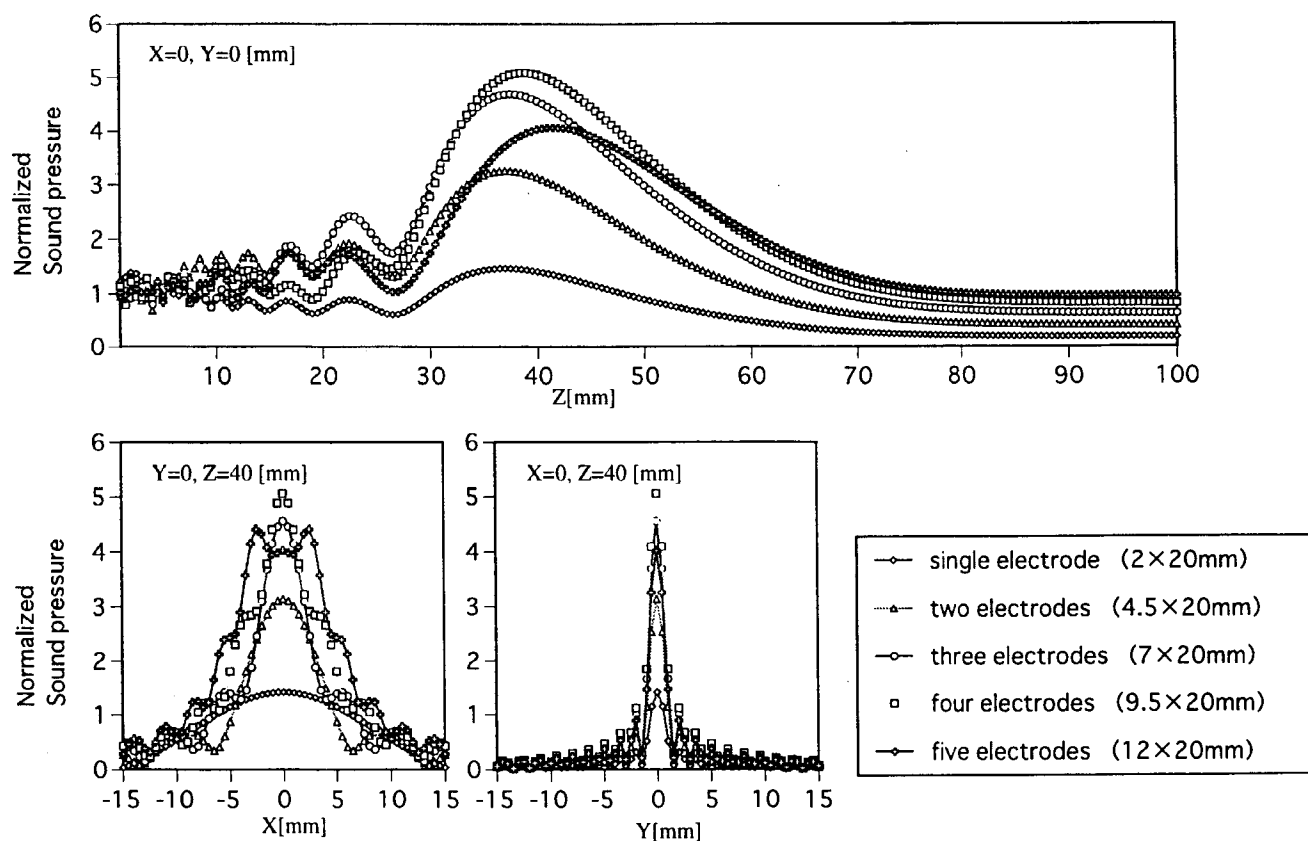


FIG. 11. Calculated distribution of sound pressure along the axes.

測定実験と同範囲について0.5mm間隔で計算を行った結果である。また、音軸上および $z=40\text{mm}$ における x 軸、 y 軸については図11に示す。

実験結果と計算値を比較すると、駆動電極数が1の場合に、大きな相違が生じていることがわかる。これは、前述のように電極の周辺部が振動しているため、電極の幅の小さい電極数が1の場合にその影響が顕著に現れていると考えられる。計算値に着目すると、電極数による音場の変化は、 $z=40\text{mm}$ における x 方向の分布に大きく影響を与えていることがわかる。電極数が1の場合、指向性が小さく、音圧が周辺に広がっている。電極数が4および5の場合、指向性は鋭いがサイドローブが表れる。また、音源が大きくなるため、比較的広い範囲に音圧が分布する。今回の実験では経験的に3電極を用いた操作を行ったが、この計算結果からも3電極程度が適切であることがわかる。

4. 結論

線集束型振動子の裏面電極を短冊状に分割した音源を用いて、その焦点位置に設置した反射板との間に生成される定在波音場の音圧の節を用いて、微粒子操作を試みた。周波数を変化することで音軸上での移動を行い、電極を切り替えることで音軸と垂直な方向の移動も可能とし、二次元マニピュレーションを実現できた。周波数を連続して変化することによる移動距離は短い、移動後に周波数を初期値に戻す操作を繰り返し行うことで長距離の移動も可能であった。また、電極切り

替えによる横方向の移動の際には、十分に強力な音圧を得るため、共振周波数において行うことが必要であった。

参考文献

- [1] 江刺正喜, "シリコン技術で作られる小さな機械," 機論(C), vol.62, no.594, pp.417-422, 1996.
- [2] J. Jin, 樋口俊郎, "静電浮上リニア駆動機構," 電気学会論文誌, vol.116-E, pp.28-33, 1996.
- [3] A. Ashkin, "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure," Phys. Rev. Lett., vol.24, no.4, pp.156-159, 1970.
- [4] 根岸勝男, 高木堅志郎, "超音波技術," (東京大学出版会, 1984) pp.59-69.
- [5] 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦, "超音波技術便覧(新訂版)," (日刊工業新聞社, 1978) pp.166-174.
- [6] M. Takeuchi, H. Abe and K. Yamanouchi, "Ultrasonic micromanipulator using visual feedback," Jpn. J. Appl. Phys., vol.35, no.5B, pp.3244-3247, 1996.
- [7] K. Yasuda, M. Kiyama and S. Umemura, "Deoxyribonucleic acid concentration using acoustic radiation force," J. Acoust. Soc. Am., vol.99, no.2, pp.1248-1251, 1996.
- [8] 小塚晃透, 辻内亨, 三留秀人, "集束超音波による定在波を用いた微粒子の一次元操作," 信学技報 US95-90 pp.9-16, 1996.
- [9] 小塚晃透, 辻内亨, 三留秀人, "多電極振動子を用いた音場移動による微粒子操作," 信学技報 US96-72 pp.15-22, 1996.
- [10] 山越芳樹, "微小粒子への放射圧を利用した測定技術," 日本音響学会誌, vol.52, no.3, pp.210-216, 1996.
- [11] E. Benes, F. Hager, W. Bolek and M. Groeschl, "Separation of dispersed particles by drifting ultrasonic resonance fields," in Ultrasonics Int.91 Conf. Proc., pp.167-170, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1991.