

交差2音源を用いた微粒子操作における位置不安定性

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、微小領域で微小物体に非接触で力を作用させる技術が求められている[1]。超音波の音響放射圧を用いることも可能であり、筆者らはこれまでに水中に定在波音場を生成して音圧の節に微小物体を捕捉し、音場を変化させることで微小物体の位置制御を行ってきた。第19回(1995年)の本研究会において、凹面型の振動子とその焦点位置に反射板を設置した集束定在波音場中で、周波数を変化することにより、音軸上を微粒子が移動することを示した[2]。第20回(1996年)の研究会では、長方形の振動子の裏面電極を複数の短冊状に分割した振動子を用いて定在波音場を生成し、駆動電極を電気的に切り替えることで音場を平行移動し、音圧の節に捕捉した微粒子を、音軸と垂直方向に移動できることを示した[3]。また、昨年の第21回研究会では、これらの手法を組み合わせた線集束型多電極振動子を用いて、微粒子の2次元操作を行った[4]。

このように振動子と反射板の間に生成される定在波音場(図1(a))を制御することで、音圧の節に捕捉した微小物体の操作が可能であるが、この手法では以下に示すような問題点がある。

(問題点1) 操作範囲が、振動子と反射板に囲まれた領域に限られる。

(問題点2) 周波数を連続的に変化する場合、音場の共鳴状態が周期的に変動し、さらに反射板からの距離によって捕捉物体の移動方向・距離が異なる。

(問題点3) 三次元操作は困難。

これらの問題点に対するため、新たな手法として音軸が交差する定在波音場を考案した。図

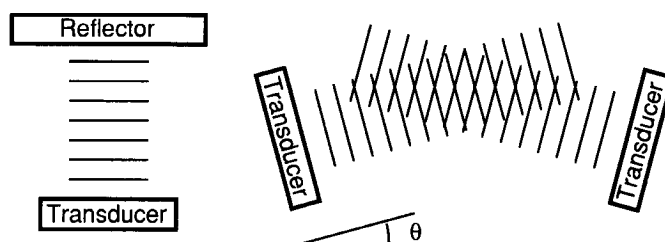
1(b)に示すように、2個の振動子を用いて音軸を交差することでその交点に定在波音場を生成し、音圧の節に微小物体を捕捉した。そして、振動子に加える位相を変化させることで、捕捉粒子の一次元操作が可能となった。また、その際に音圧の節の移動方向と垂直な方向にも、周期的な変動が観察されたので実験的に評価した。

2. 音場

2.1 交差2音源

本報告では2個の平板円形振動子を用いて進行波を放射し、それぞれの音場の最終局大付近で音軸を交差することで、振動子間から離れたところに定在波音場を生成する。この音場は放射した音波が振動子に戻らないため音場が共鳴することではなく、周波数変化時にも安定した定在波音場の生成が可能と考えられる。そして、角度が緩やかであれば、3次元的に広がる水槽中の同一面から音波を放射し、水槽中の定点に物体を捕捉することが可能であると考えられる。また、位相を変化させることで音圧の節の位置を一次元的に移動させることが可能となる。

図2は、シュリーレン法で可視化した音場である。振動子から音軸の交点までの距離は



(a)反射板使用

(b)交差2音源

図1. 定在波音場

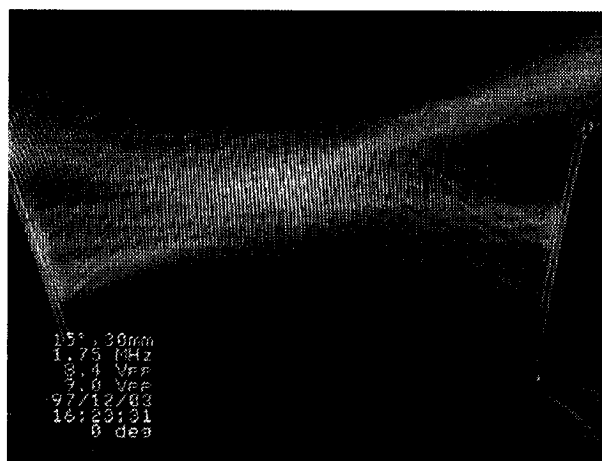


図2. 交差2音源によるシュリーレン像

30mm、水平面と音軸の成す角度 θ は上方に 15° である。左右の2つの音源から放射された音波が重なり合い、定在波音場が形成されていることがわかる。

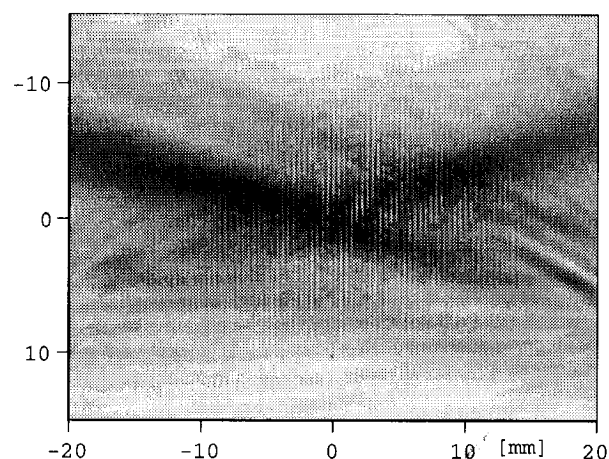
2.2 ハイドロホンによる音圧分布の測定

シュリーレン法による音場の映像化は、非接触で瞬時に二次元分布が得られる点が大きな特徴であるが、三次元的に分布する音場を二次元平面上に投影するため情報の圧縮が行われ、音圧の絶対値を得ることは困難である。そこで、ハイドロホンを用いて音圧分布の測定を試みた。NTR社製の直径0.6mmのPVDFハイドロホンを音場中で0.2mm間隔で2次元的に移動し、音圧の2次元分布を測定した。図3(a)は音軸を含む垂直面、同図(b)は音軸の交点を含む水平面における音圧分布の測定結果である。音軸の交点付近で縞状に音圧の高低が観察され、2音源からの音波の干渉により定在波音場が生成されていることがわかる。なお、各振動子における音軸上の音圧分布を調べたところ、振動子から最終極大までの距離は約33mmであり、直径約11mm相当の部分が振動していると考えられる。

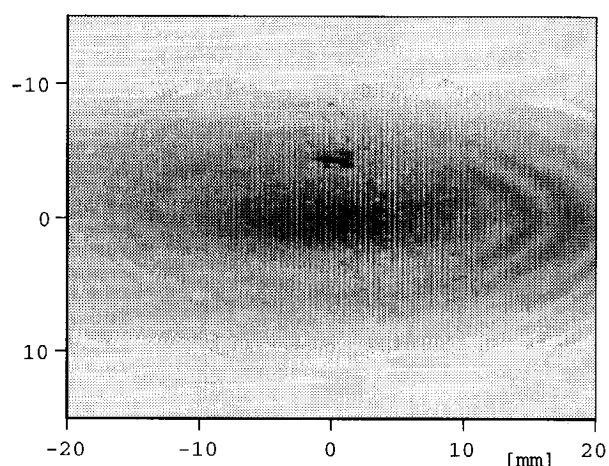
3. 実験

3.1 実験装置

図4に実験装置を示す。振動子は図2、図3の実験で用いたものと同様のものである。直径20mm、共振周波数1.75MHzの平板円形の圧電セラミックス製で、直径30mmの亚克力パイプ中にシリコンゴムで固定した。2個の振動子



(a)音軸を含む垂直面



(b)音軸の交点を含む水平面

図3. ハイドロホンによる音圧分布測定結果

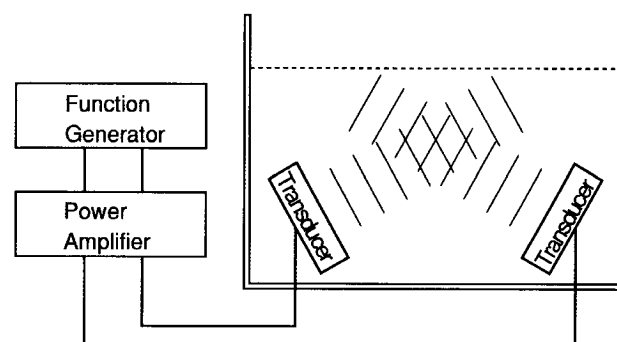


図4. 実験装置

は図4に示すように、水槽の底に斜め上方を向けて対向して設置し、音軸の交点について左右対称に固定した。ファンクションジェネレータ(NF回路設計ブロック製1964、2ch)より出力した信号を2台のアンプ(ENI製325LA、50dB)で増幅して各振動子に10~30Vppの電圧を印加し、水中に超音波を放射して音軸の交点付近に定在波音場を生成した。

3.2 粒子捕捉

振動子から音軸の交点までの距離を 33mm に固定し、水平面と音軸の成す角度 θ を上方に 15° 、 30° 、 45° の 3 通りについて実験を行った。振動子に 1.75MHz、20Vpp の連続正弦波を印加すると、図 2、図 3 に示すように、振動子間中央の上方に定在波音場が生成された。

この定在波音場中に研磨用のアルミナ粒子（比重 3.95、平均粒径 $16\mu\text{m}$ ）を投入したところ、層状になって流れ落ちる現象が観察され、定在波音場中で粒子に音圧の腹から節に向かう力が作用していることが確認できた。定在波音場中で粒子のポテンシャルを考えると、音圧の腹は山、音圧の節は谷になる。音軸方向には $1/4$ 波長間隔で音圧の節と腹が存在するので強力な力が作用するが、音軸と垂直方向には振動子直径に相当する広範囲になだらかな音場が広がるため、粒子に作用する力は非常に小さいと考えられる。アルミナ粒子は比重が大きいため、定在波の軸と重力の方向が垂直の場合、捕捉は容易ではない。そこで、比重 1.05 のポリスチレン粒子（粒径 $100 \sim 500\mu\text{m}$ ）を用いて実験を行った。その結果、 $\theta=15^\circ$ 、 30° において粒子は音圧の節に捕捉され静止したが、 $\theta=45^\circ$ の場合には粒子は音場から上方にはじき飛ばされた。また、重力による影響を検討するため上下を逆にした実験を行ったところ、同様に $\theta=15^\circ$ 、 30° では捕捉可能であるが、 $\theta=45^\circ$ では捕捉不可能であった。

3.3 位相変化による粒子位置制御

音場を変化して粒子操作を行うために、 $\theta=15^\circ$ において直径約 $400\mu\text{m}$ のポリスチレン粒子を捕捉した状態で、2 つの振動子に入力する信号の位相を変化させる実験を行った。1 秒毎に 30° ずつ段階的に位相を変化し、96 秒間で 2880° （8 周期）変化させた際の粒子の挙動を VTR で記録し、画像処理を行って粒子移動の軌跡を解析した。図 5 に (a) 粒子および (b) 粒子移動時の多重露光写真を示す。捕捉された粒子は水平方向に移動することがわかる。図 6 に画像計測における粒子の (a) 水平、(b) 垂直方向の位置の変化を示す。水平方向には位相差に比例した粒子の移動が観察され、その移動距離は 360° あたり半波長に相当することがわかる。垂直方向には 1200° 付近で不規則な点があるが、 360° の周

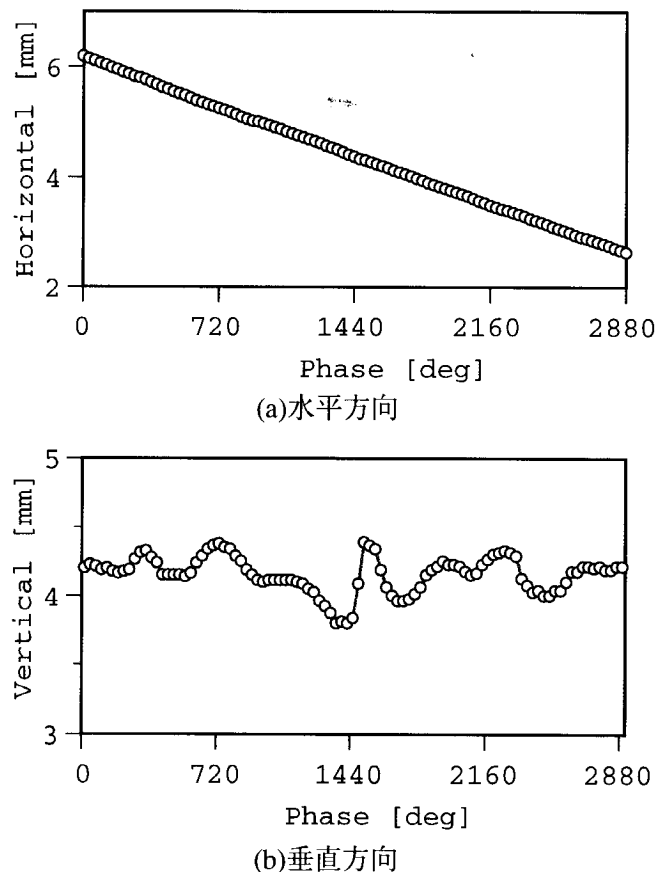
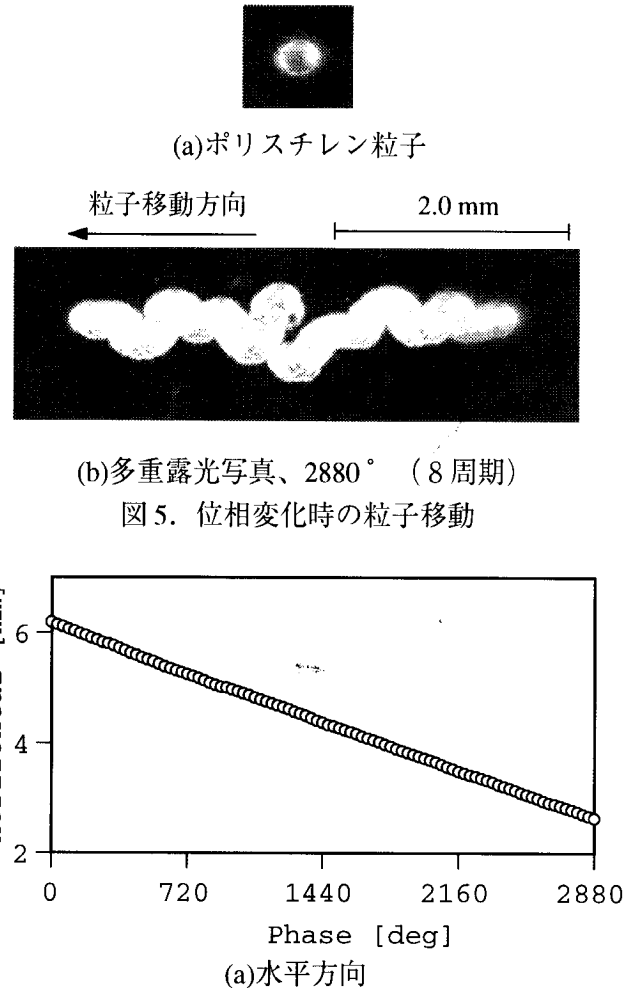


図 6. 画像処理による粒子位置計測結果

期で周期的に変動していることがわかる。なお、粒子位置の座標の原点は画像中の左下であり、粒子は右から左に移動しているため、図 5 の写真と図 6 (b) のグラフの変化は左右が逆になっている。

3.4 周波数差による粒子等速移動

位相を連続的に変化させるために、2 音源に加える周波数をわずかに変えた実験を行った。図 7 は、 $\theta=15^\circ$ で左側の振動子を 1.75MHz に固

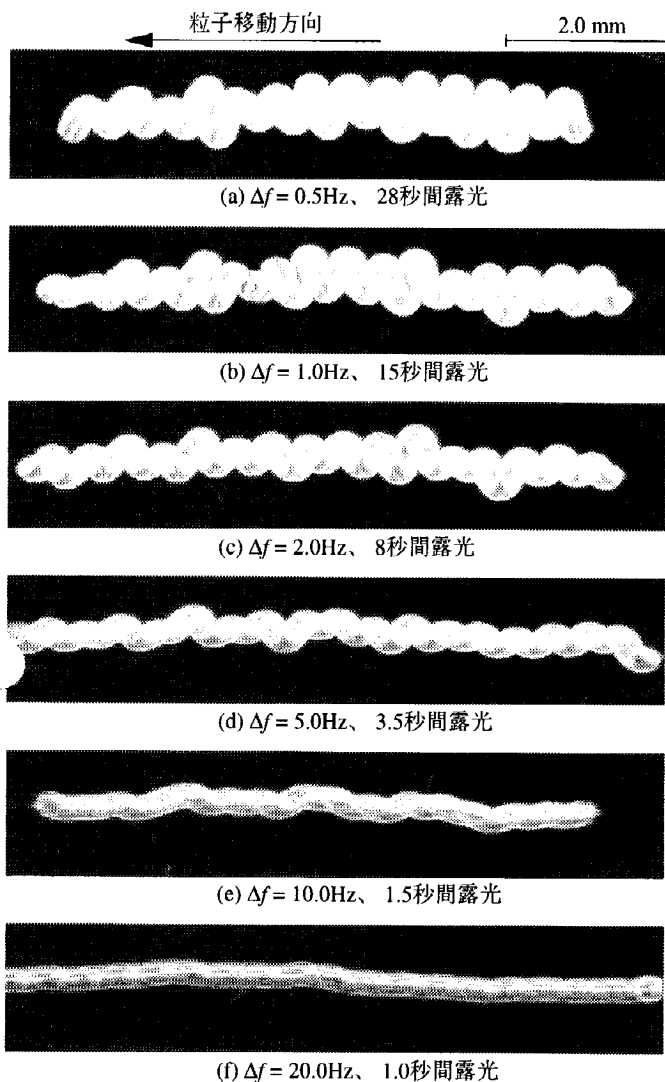


図7. 周波数差による粒子移動の多重露光写真

定し、右側の振動子との周波数差 Δf を0.5、1.0、2.0、5.0、10.0、20.0Hzとした際の、粒子移動時の多重露光写真である。また、図6と同様に画像計測した粒子位置を図8に示す。なお、グラフの横軸の縮尺は Δf の逆数の比とした。位相変化時と同様に、水平方向には一定速度で移動し、垂直方向には周期的に変動する様子がいずれの場合にも見られる。周波数の差が $\Delta f\text{Hz}$ の場合、 $\Delta f \times 360^\circ / \text{秒}$ の位相変化が存在するため、水平方向の移動速度は周波数差 Δf に比例することがわかる。また、垂直方向については Δf が1.0Hz以上では、 Δf が大きいほど、変動幅が小さくなることがわかる。これは、垂直方向の変化の速度が速すぎて、粒子が追従できないためと考えられる。なお、 Δf が1.0Hz以下における垂直方向の変動幅は今回の実験では約0.6mmであった。

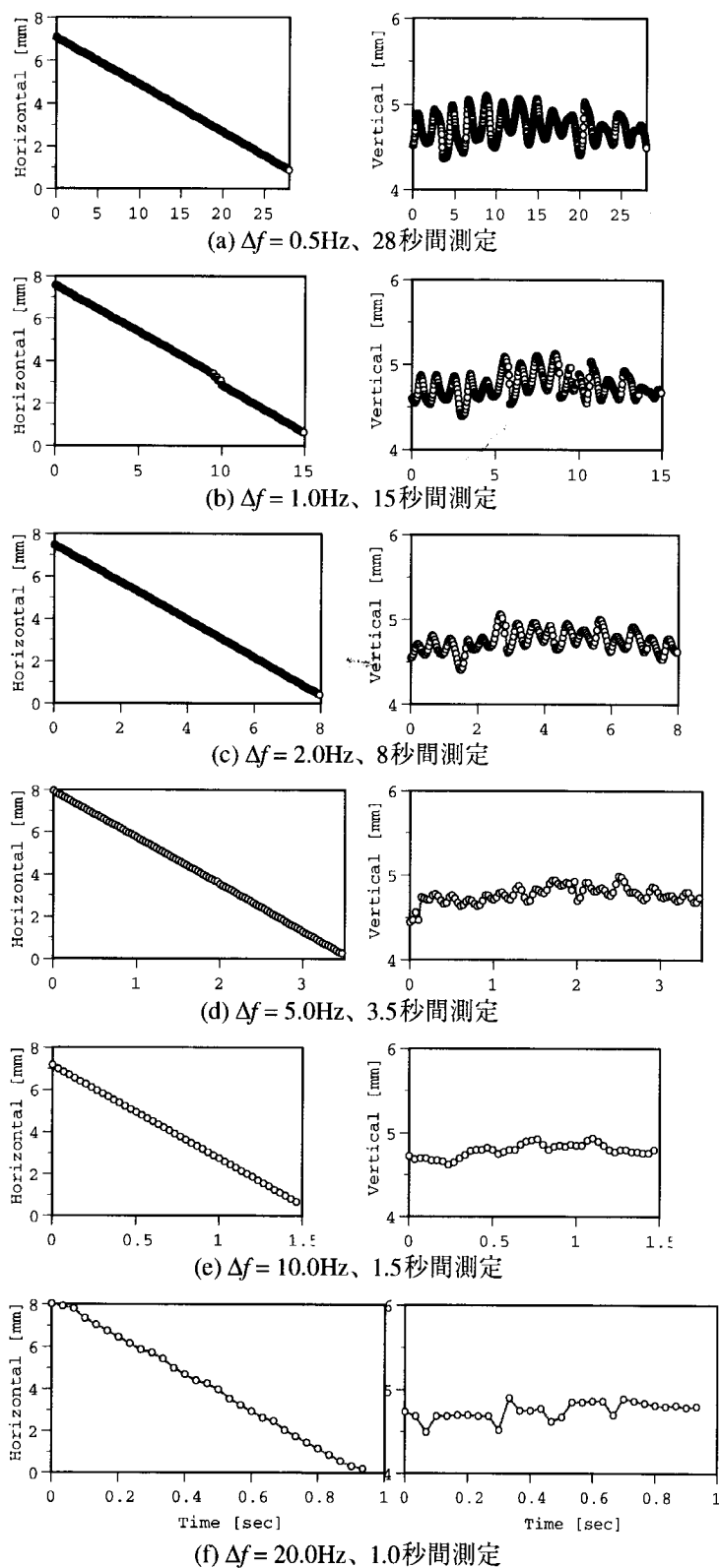
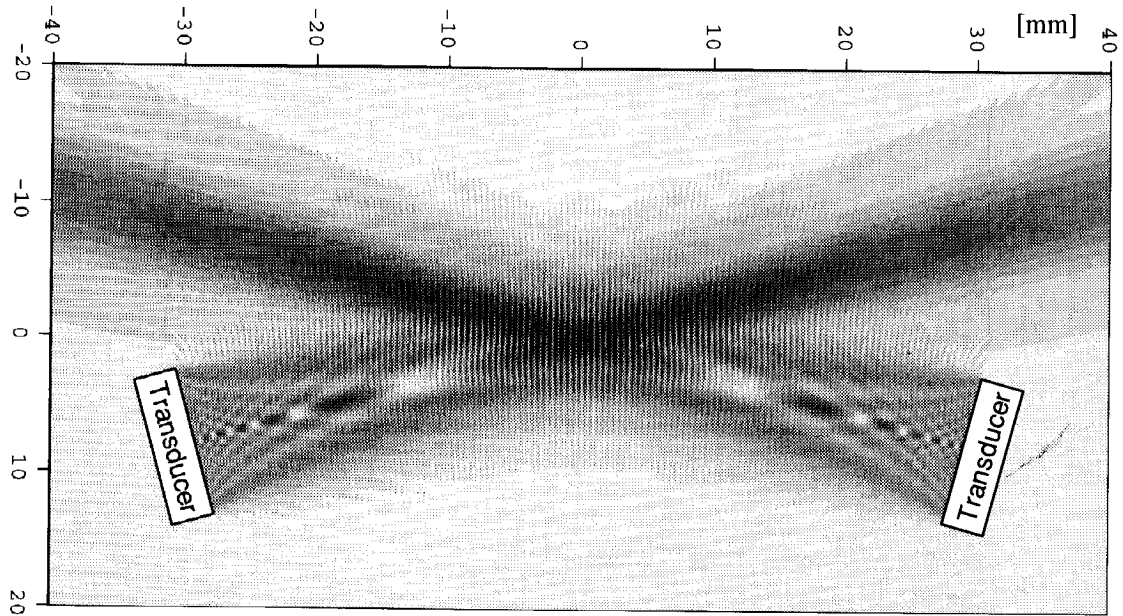


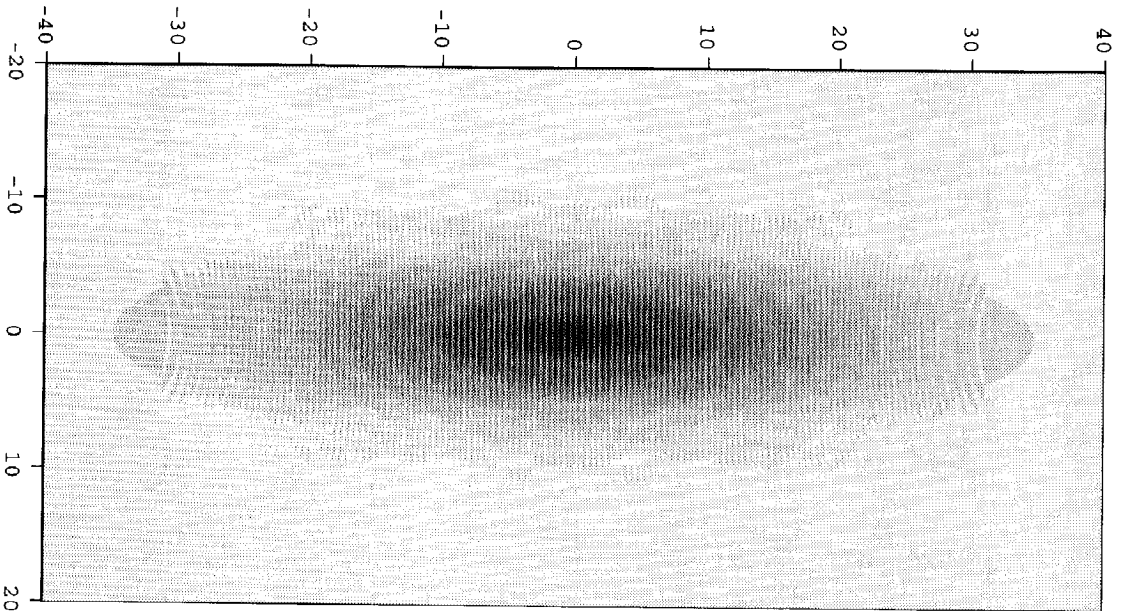
図8. 周波数差による粒子移動の位置計測

4. 考察

振動子の形状、周波数、位相等により音場は異なる。これまでに述べてきたシュリーレン法による音場の可視化や、ハイドロホンによる音圧の絶対値測定により音場を計測することは可能であるが、任意の音場を設計する上で、振動



(a)音軸を含む垂直面



(b)音軸の交点を含む水平面

図9. 音軸が交差する2音源定在波音場の計算による音圧分布

子から放射される超音波の音圧分布を、コンピュータでシミュレートすることは重要である。

2個の音源面 F_1 、 F_2 からの音圧 p は、各振動子との距離を r_1 、 r_2 とすると、Rayleighの式[5]を変形して、次式で表される。

$$p = j \frac{\rho c V_0}{\lambda} \exp(j\omega t) \iint_{F_1} \frac{\exp(-jk r_1)}{r_1} dF_1 + j \frac{\rho c V_0}{\lambda} \exp(j(\omega t + \phi)) \iint_{F_2} \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} dF_2 \quad (1)$$

ここで、 V_0 は音源面の振動速度振幅、 ρ は媒質の密度、 c は媒質中の音速、 λ は媒質中の波長、 ω は角周波数、 $k = \omega/c$ 、 ϕ は2音源の位相差である。このうち $\exp(j\omega t)$ は、時間 t に関する変動分であるので、位置による分布を求めるには、二重積分部分について計算を行えばよい。図9は、直径11mm、1.75MHz、 $\theta = 15^\circ$ 、音軸の交点までの距離30mmの場合における、(a)音軸を含む垂直面および(b)音軸の交点を含む水平面の音圧分布を、式(1)の二重積分部分を計算して得た結果で

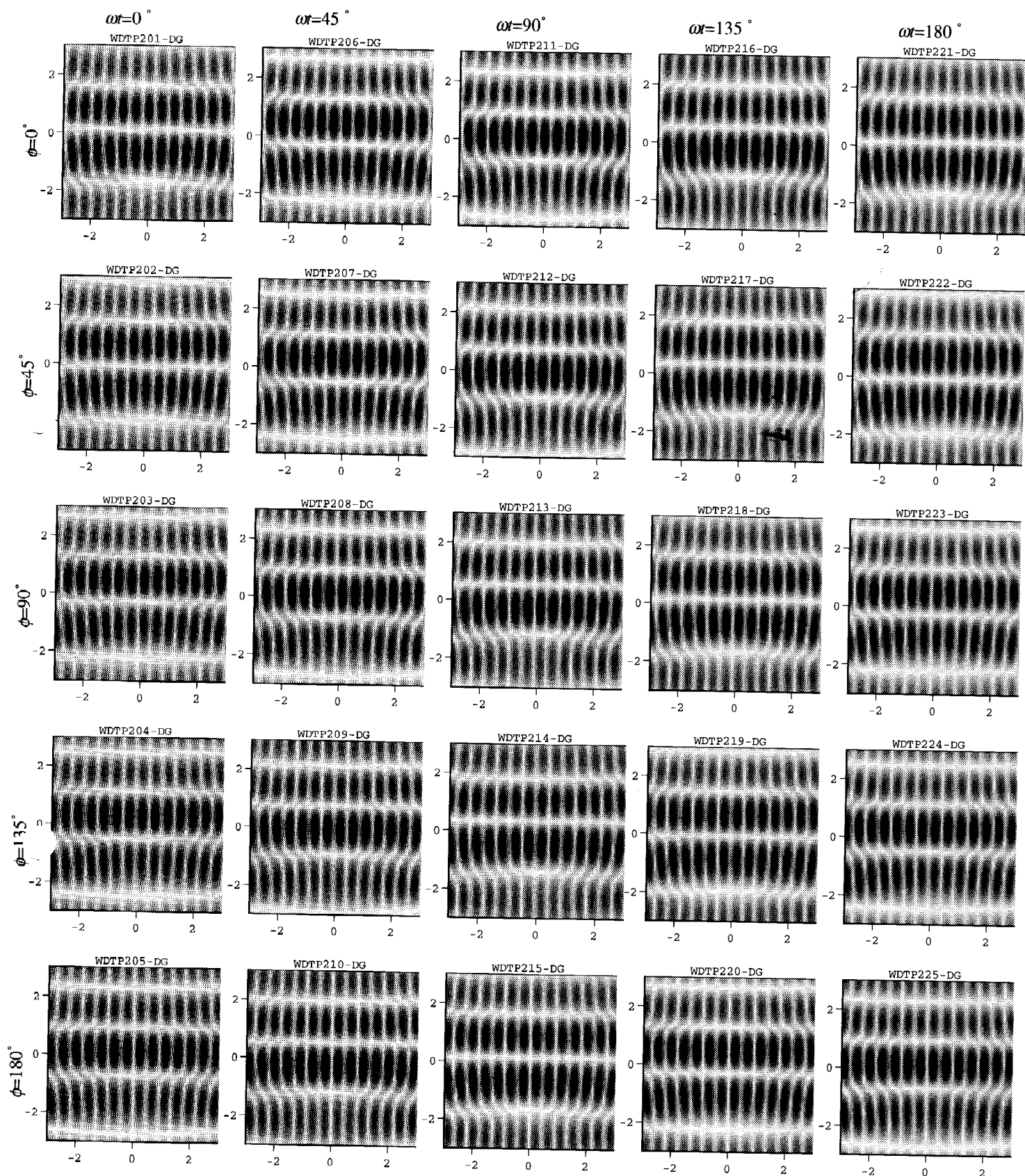


図10.時間項を考慮した音圧の瞬時値
(振動子は斜め上方に設置、この図のみ上下が逆)

ある。図3のハイドロホンによる測定結果とはほぼ一致していることがわかる。

次に音圧の瞬時値を求めるために、式(1)の実数部分について計算を行う。時刻 t における位相角 ωt および2音源間の位相差 ϕ を、それぞれ 0° から 180° まで 45° 毎に計算した音軸の交点付近の音圧分布を図10に示す。音圧分布が縦長の格子状になっていることがわかる。音圧分布は時刻 t の経過に伴って(ωt が 0° から 180° まで変化)上方(図中では下方)に移動する。また、2音源の位相差 ϕ による影響は、水平方向には粒子の移動に対応した音圧分布の移動が表れている。なお、垂直方向にも粒子の移動に対応した動きが見られるが、時刻 t の経過に伴う位相角 ωt の変動速度を考慮すると、粒子の動きの説明としては不十分である。

5. 結言

本報では、水中超音波の定在波を用いた非接触マイクロマニピュレーションを検討した。反射板を用いた定在波音場では音場の範囲、周波数変化時の移動方向・移動距離、そして音場の共鳴が問題であった。そこで、音軸が交差する2音源による定在波を用いた微粒子操作を試み

た。音軸が水平と成す角度 θ が 15° の場合、微粒子操作が可能で、位相を変化することで捕捉粒子の移動が可能であった。また、周波数に差を与えることで、一定速度での移動も可能であった。粒子は音圧の移動方向と垂直な方向にも周期的に振動し、その変位は周波数差が 1.0Hz 以下において約 0.6mm であり、移動速度が速くなると減少した。

文献

- [1] 江刺, "シリコン技術で作られる小さな機械," 機論(C), **62-594**, pp.417-422, 1996.
- [2] 小塚, 辻内, 三留, 福田, "集束超音波による定在波を用いたマイクロマニピュレーション," 信学論(A), **80-10**, pp.1654-1659, 1997.
- [3] T. Kozuka, T. Tuziuti, H. Mitome and T. Fukuda, "Acoustic Micromanipulation Using a Multi-Electrode Transducer," 7th Int. Sympo. Micro Machine & Human Science Proc., pp.163-170, 1996.
- [4] T. Kozuka, T. Tuziuti, H. Mitome and T. Fukuda, "Control of a Standing Wave Field Using a Line-Focused Transducer for Two-Dimensional Manipulation of Particles," Jpn. J. Appl. Phys. Vol.37, Part.1-5B, pp.297-2978, 1998.
- [5] 根岸, 高木, 超音波技術, pp.159, 東京大学出版会, 1984.