

平成21年6月22日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560248

研究課題名（和文） 超音波を用いた非接触操作技術の開発と応用

研究課題名（英文） Study and Application of Non-Contact Acoustic Manipulation

研究代表者

小塚 晃透 (KOZUKA TERUYUKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員

研究者番号：60357001

研究成果の概要：

空気中において、超音波の定在波を用いた非接触物体捕捉に関する研究を行った。28kHzの空中超音波音源を試作し、凹面型反射板との間で定在波音場を生成した。実験で物体に作用する力を測定すると共に、数値計算で音圧の分布及び音場中の物体に作用する力を求めたところ、定性的な一致が確認された。良好な条件下では、直径2mmの鉄球を音圧の節に捕捉（浮遊）できることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：音響エネルギー、超音波

## 1. 研究開始当初の背景

空気や水等の流体媒質中を進む超音波を物体で遮ると、物体には音波の進行方向に押す力が作用する。この力は音響放射圧と呼ばれ、古くから知られている。しかし、音響放射圧による力は非常に小さく、これまで産業に応用されることは少なかった。

近年、マイクロマシンやバイオテクノロジー等において、微小な物体を非接触で操作するための技術が求められている。本研究代表者らは、音響放射圧による力は微弱であるが、

微小な物体を操作するための力としては十分であると考え、これまで水中超音波を利用した非接触マイクロマニピュレーションに関する研究に取り組んできた。そして、複数の超音波を水中で干渉させて定在波音場を生成し、微小物体を定在波の音圧の節に捕捉することを行い、超音波の位相を制御することで、捕捉した微小物体を非接触で3次元空間中（水中）にて操作する技術を確立した。

水中よりも媒質の密度が小さい気体中においては、物体に作用する力は更に弱くなる

が、同様の現象は現れる。気体中での超音波による非接触物体保持（超音波浮揚）に関する研究は、1990年代に行われたスペースシャトルを用いた無重力場の材料実験における試料を非接触で定位置に保持するための超音波浮揚装置の開発として、盛んに行われてきた。無重力場であれば重力の影響を受けないため、質量の大きな物体を微弱な力で保持することが可能である。なお、浮揚のための手段としては、他にも静電気や磁力、レーザー光の放射圧などを用いる手法があるが、超音波浮揚の特徴としては、対象物質の物性に左右されないという汎用性がある。

宇宙空間のみならず地上においても、同原理による物体浮揚が可能である。ただし、重力による影響を受けるため、質量の大きな物体の浮揚は困難である。地上における超音波浮揚に関するこれまでの研究は、大気中を浮遊する粉塵や煙の粒子を捕捉・除去する研究や、霧化した微小液滴を凝集・回収する研究、強力な音場を生成して、液滴やガラス球などの重量物を捕捉する研究などが行われている。いずれも超音波の音源と反射板を平行に配置して静的な定在波を生成し、音圧の節に物体を捕捉する手法を用いている。

## 2. 研究の目的

本研究では、超音波を用いて、固体物体および液滴等を非接触で確実に捕捉する手法の確立を目的とする。そのために、強力な超音波を気体中に放射する手法を検討し、定在波音場中における音圧の最大化を図る。また、音場中の微小物体に作用する力を理論的に見積もると共に、実験で捕捉された物体に加わる力を計測して検証する。

本研究は、様々な応用が考えられる基盤技術である。本研究による成果は、空気中を浮遊する微小液滴の蒸発や合体などの挙動を解析するための研究用機器、工場などの粉塵や有機物液滴等を捕獲・除去するエアフィルター、そして、花粉、孢子、微小昆虫などの飛翔解析のための捕捉手段、環境計測のための大気中浮遊物の捕獲手段等に発展させることも目的である。

## 3. 研究の方法

### (1) 強力超音波の発生

強力な超音波を発生させるには、音源である振動子の振動振幅を、ホーンを用いて増幅することが有効である。振動子は既製品より選定したが、ホーンは必要なスペックを算定

して、形状・材質を設計して製作した。作成したホーンの振動振幅は、レーザドップラ振動計を用いて評価した。

### (2) 強力定在波音場の生成及び物体捕捉

強力な定在波音場を得るためには、音源を強力なものにすると共に、反射板についても検討する必要がある。例えば、反射板として凹面形状の反射板を用いることで音波を集束させ、強力な定在波音場を生成することができると考えられる。このようにして生成した音場は、マイクロホンによる音圧の絶対値測定を行うと共に、音場中に微小物体を投入してその物体に作用する力を測定することで評価した。

### (3) 音場の数値シミュレーション

音源からの進行波音波による音圧計算は、Rayleighの式を用いて計算することができる。この式を用いて、音源からの音波による反射板表面における音圧を一旦計算し、反射板表面を新たな音源としてそこから放射される音波による音圧を計算することで、反射波が計算できると考えられる。更に、反射板からの音波による音源面での反射を計算し、同様の計算を複数回行うことで、音源面と反射板面での複数回の反射波の計算を行い、その結果を重畳することで定在波音場中の音圧分布を計算することができる。そして、このようにして得られた定在波音場中の音圧分布を用いて、物体に作用する力を算出することが可能となる。

### (4) 定在波音場中で物体に作用する力の評価

定在波音場中には固体粒子、液滴などを投入してその捕捉を試みた。物体に作用する力は、物体を糸で吊し、物体の荷重を測定することで求めた。また、物体に作用する音響放射圧による力は、計算機シミュレーションで理論的に見積もることも可能であり、実験結果と比較した。

定在波音場中に投入した物体の挙動は、ビデオカメラで観察した。一旦ビデオレコーダーで記録した動画は、コンピュータによる画像処理により、その挙動を解析した。そして、安定した物体捕捉の手法、及び観察手法を検討した。

### (5) 初速度を持った物体の捕捉

反射板の中央に直径 2mm の穴を開け、音場の上方より物体を初速度を持って投入し、物体を制動して捕捉する実験を行った。

### (6) 超音波暴露と安全性

空中超音波を扱う実験では、超音波暴露が問題である。この実験装置周辺の音圧分布を測定して、安全性について検討を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1)強力超音波の発生

強力な超音波音場を発生させるために、基本周波数28kHz、直径25~35mmの平板円形、振動振幅15ミクロンの音源(ランジェバン型振動子、ホーン、電気回路)を試作した。低周波数ほど大きな力を作用させることができるが、可聴域の音波では超音波暴露の問題がある。そこで、既製品の振動子より28kHzを選定した。物体を保持するためには、音源の振動振幅は10ミクロン以上が必要であることがこれまでの実験からわかっていたので、振動振幅が15ミクロン程度となるように、ホーン及び駆動用電気回路を設計した。ホーン先端の形状は円形とし、直径は $\phi$ 20mm、 $\phi$ 25mm、 $\phi$ 30mmの三種類を作成した。なお、実験中の発熱による共振周波数の変動に対応するため、周波数の自動微調整機能を駆動回路に付加した。

##### (2)強力定在波音場の生成及び物体捕捉

音源を上に向け、その上方に反射板を対向させて配置することで、定在波音場を生成した。反射板には、直径50mmの円形の平面ガラス板および2種類の曲率半径を持つ光学用凹面レンズを用意した。音場中の音圧分布をマイクロホンで測定したところ、凹面反射板を用いた際に最大音圧約3000Paの定在波音場が測定された。これは平面反射板時の最大値の約2倍の音圧であり、凹面反射板を用いることで音波を集束させ、強力な音場が生成できることが分かった。生成した定在波音場中で、発泡スチロール球、鉄球、水滴、液状ゴム等の捕捉実験を行ったところ、いずれも捕捉可能であった。また、液状ゴムを捕捉した状態で、乾燥させて固体化することも可能であり、非接触の成形の可能性を見出した。しかし、捕捉した液滴の大きさ、形状等を制御することは難しく、成形に利用するには更なる研究が必要である。

##### (3)音場の数値シミュレーション

音源からの進行波音波による音圧を計算するプログラムを、C言語で作成した。反射板表面における音圧を一旦計算し、その反射板表面を新たな音源として音源面上の音圧を計算し、同様にして複数回の反射波の計算を行った。計算結果は、マイクロホンによる測定結果と定性的に一致し、本手法の有用性を確認した。そして、この音圧値を基に、物体に作用する力を計算するプログラムを作成した。

定在波音場中の音圧、および音場中で物体に作用する力を計算する手法を得たことで、実験を行うことが困難な微小物体に作用する力についても、数値計算で推定することが可能となった。

##### (4)定在波音場中で物体に作用する力の評価

物体に作用する力を評価するために、反射板の中央に直径2mmの穴を開け、細い糸を取り付けた鉄球に加わる荷重を電子天秤で測定した。直径2mmの鉄球には、音波の伝搬方向には最大で $5 \times 10^{-4}$ Nの力が作用していることが実験により測定された。これは重力による力を超えているため、地上において非接触で浮遊させることが可能である。なお、音波の伝搬方向と垂直な方向には、 $1 \times 10^{-4}$ Nの力が測定された。音圧分布から物体に作用する力を計算したところ、実験値に相当する値を得た。

##### (5)初速度を持った物体の捕捉

反射板の中央に開けた直径2mmの穴を用い、音場中に上方より直径1mmの鉄球を投入したところ、鉄球は上端部に捕捉されるか、音場中を落下してしまい、途中で捕捉することができなかった。静かにピンセットで投入すれば途中の音圧の節に捕捉することはできるが、初速度を持って音場中に進入した物体の捕捉は困難であった。次に、同じく反射板の穴より注射針を挿入し、水滴を音場中に注入した。共鳴状態でなければ直径2~3mm程度の液滴となるが、共鳴状態では上下から押し潰されるようにして水平面上に広がり霧化する様子が高速カメラで観察された。また、注射針から勢いよく噴射すると、6mm間隔で存在する音圧の節の各層で一瞬跳ね返されるが、次々と突き抜けていく様子が観察された。高音圧下でも定在波音場は形成されているが、落下する物体を保持することは難しいことがわかった。

##### (6)超音波暴露と安全性

空中超音波を扱う実験では超音波暴露が問題である。この実験装置周辺の音圧分布を測定したところ、定在波音場中では150dBを超える高音圧であったが、数メートル離れば通常の騒音レベルまで低下することが確認された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 小塚晃透、安井久一、辻内亨、砥綿篤哉、ジュディ・リー、飯田康夫、  
Measurement and Numerical  
Calculation of the Force on a  
Particle in a Strong Acoustic Field  
for levitation, Japanese Journal of  
Applied Physics, Vol. 48 (印刷中)、  
2009、査読有り

② 小塚晃透、安井久一、辻内亨、砥綿篤哉、飯田康夫、Acoustic Manipulation in Air Using a Standing Wave Field、Nonlinear Acoustics-Fundamental and Applications(ISNA18)、pp.115-118、2008、査読有り

③ 小塚晃透、安井久一、辻内亨、砥綿篤哉、飯田康夫、Acoustic Standing-Wave Field for Manipulation in Air、Japanese Journal of Applied Physics、Vol. 47、pp.4336-4338、2008、査読有り

[学会発表] (計 7 件)

① 小塚晃透、安井久一、空中超音波を用いた非接触マニピュレーション、日本機械学会関東支部第15期総会講演会、2009年3月7日、茨城大学

② 小塚晃透、安井久一、辻内亨、砥綿篤哉、ジュディ・リー、飯田康夫、超音波浮揚における強力音場生成のための音源及び反射板の検討、第29回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム、2008年11月13日、仙台市シルバーセンター

③ 小塚晃透、安井久一、辻内亨、砥綿篤哉、飯田康夫、Acoustic Manipulation in Air Using a Standing Wave Field、18<sup>th</sup> International Symposium on Nonlinear Acoustics、2008年7月9日、KTH(スウェーデン)

④ 小塚晃透、安井久一、辻内亨、砥綿篤哉、飯田康夫、超音波を用いた非接触マニピュレーション、平成20年度産業技術総合研究所中部センター研究発表会、2008年5月20日、デザインセンタービル・ナディアパーク

⑤ 小塚晃透、安井久一、凹面反射板を用いた気体中定在波音場による非接触マニピュレーション、日本音響学会2008年春季研究発表会、2008年03月19日、千葉工業大学

⑥ 小塚晃透、安井久一、辻内亨、砥綿篤哉、飯田康夫、気体中超音波マニピュレーションのための定在波音場の検討、第28回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシホ

ジウム、2007年11月14日、つくば国際会議場

⑦ 小塚晃透、安井久一、超音波浮揚のための音場の検討、2007年度非線形音響研究会、2007年07月21日、加藤科学振興会 軽井沢研修所

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]  
○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

小塚 晃透 (KOZUKA TERUYUKI)  
独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造  
プロセス研究部門・主任研究員  
研究者番号：60357001

##### (2) 研究分担者

安井 久一 (YASUI KYUICHI)  
独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造  
プロセス研究部門・主任研究員  
研究者番号：30277842

##### (3) 連携研究者

なし