



# 超音波による物体の非接触搬送

## Noncontact Transportation Using Ultrasound

小山 大介

Daisuke KOYAMA

同志社大学理工学部 教授

Professor, Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, JAPAN

### 抄 録

物体に超音波を照射すると、その表面には超音波周波数の圧力変動に加えて直流成分の放射力（音響放射力）が働く。この音響放射力を利用すると、音響定在波中において物体を非接触で浮揚・搬送することができる。本稿では、著者らのグループがこれまでに開発した超音波による非接触搬送装置（一次元搬送、周回搬送、二次元搬送）について紹介した。いずれの装置においても、圧電超音波振動子への入力電気信号によって超音波振動と音場を制御し、物体の空間位置を操る点で本質的には同じ技術を用いている。装置の構造は有限要素解析による数値シミュレーションによって決定している。また、物体の浮揚位置と搬送軌跡は数値計算結果と音響放射力に関する理論式によって予測することが可能である。本技術は将来的に、精密電子部品や錠剤などの製造ラインへの応用のみならず、粉体のハンドリング技術、バイオテクノロジー分野における液体や細胞などのマニピュレーション技術への展開が期待される。

### ABSTRACT

Acoustic radiation force is a static force generated by a difference in the acoustic energy densities of two media. Small objects can be levitated and transported by acoustic radiation force in an acoustic standing wave. The present paper introduced noncontact ultrasonic transportation of small objects: linear transportation over a long distance, transportation in a circular trajectory, and two-dimensional transportation. In these techniques, the ultrasound vibration of a plate and the sound pressure distribution can be controlled by the electric input to piezoelectric ultrasound transducers, enabling the control of positions where the objects were trapped. The configuration of the systems can be determined by finite element analysis, and the acoustic field and the transportation trajectory of the manipulated objects can be predicted by the theoretical equation of the acoustic radiation force. These techniques are expected to be applied to not only product lines for precise electronic components and tablets but also a manipulation of powder, liquid, and cells in the field of biotechnology.

## 1 はじめに

物体に超音波を照射すると、その表面には超音波

周波数の圧力変動に加えて直流成分の放射力が働く。本来三角関数で表される単一周波数の音波の圧力を時間平均すると、正圧・負圧のトータルは0と



なるはずである。しかしながら、音波の2次の微量まで含めた非線形音響領域まで考慮すると、この直流成分が理論的にも現れてくる。この音波の直流成分の放射力は音響放射力 (acoustic radiation force) と呼ばれる (Chu B. and Apfel E., 1982; Koyama D. et al., 2012)。音響放射力を利用することによって、物体を音場中に非接触で浮揚させることができる。また、その音場を空間的、時間的に制御することによって、浮揚物体を非接触で搬送することも可能である。代表的な物体の非接触搬送技術としては、空気圧や磁力を利用した手法が挙げられる。これらの手法と比較した場合、超音波による手法では、エアコンプレッサやエア配管が不要でシステム全体の構成が簡素であることや、非磁性体材料の物体にも適用可能など、将来的な産業用途への応用を考えた場合の高い実用性が利点として挙げられる。本稿では、主に著者らのグループがこれまでに開発した超音波による非接触搬送技術について紹介させて頂く。

## 2 一次元直線搬送

超音波定在波中での物体の浮揚は古くから知られた現象であり、これまでも数多くのグループによって報告されている (Hoshi T. et al., 2014; Andrade M.A.B. et al., 2015)。単純かつ安価に超音波定在波を発生させる手法として、一般的には一組の超音波振動子と反射板が用いられることが多い。空気中で、振動板とその振動面に平行に設置した反射板との距離を調整することによって、振動板・反射板間には超音波定在波が発生する。発泡スチロールの様な比較的密度の小さい材質で作られた、音波の波長に対して十分小さい数 mm 程度のサイズの微小球が定在波中に存在すると、球は音響放射力によって定在波の音圧節部 (音圧振幅が0の位置) 付近に捕捉され浮揚する。実際には、物体の重力と放射力のバランスによって最終的な捕捉位置が決まるため、音圧節部よりはわずかに下の位置で浮揚する。反射板の代わりにもう一つ超音波振動子を用い、これら二つの振動子間の駆動位相差を変化させることによって浮揚した物体を非接触で移動させることも可能である (Kozuka T. et al., 2007)。これらの非接触浮揚・搬送技術では、物体の搬送可能範囲は物体の重量、超音波強度などに依存し、例えば空気中で数 10 kHz の

超音波を用いた場合、超音波伝搬時の減衰によって現実的には長くとも数 10 cm 程度の搬送距離となってしまふ。製造ラインなどへの応用を想定し、より長距離搬送を実現したい場合、音響導波路を用いることによってこれが可能となる。

図1は著者らが開発した長距離直線非接触搬送装置と微小物体の浮揚の様子である (Koyama D. and Nakamura K., 2010)。装置は2本のホーン付ボルト締めランジュバン型超音波振動子、振動板、それに平行に設置された反射板で構成される。ジュラルミン製振動板 (厚さ 3 mm, 幅 60 mm, 長さ 605 mm) の両端部から 35 mm の位置に、ホーン付ランジュバン型振動子をネジで締結している。振動子に電気信号を入力すると、逆圧電効果によって振動子には縦振動が発生し、振動拡大用のホーンを介して、振動板にはたわみ振動が発生する。これらの振動系の形状は有限要素法 (FEM) によるシミュレーションによって決定することができる。振動板に共振たわみ振動が発生する周波数 22.5 kHz で、振動板・反射板間の空气中に超音波定在波が発生する様に、板間距離を 17 mm としている。すなわち振動板・反射

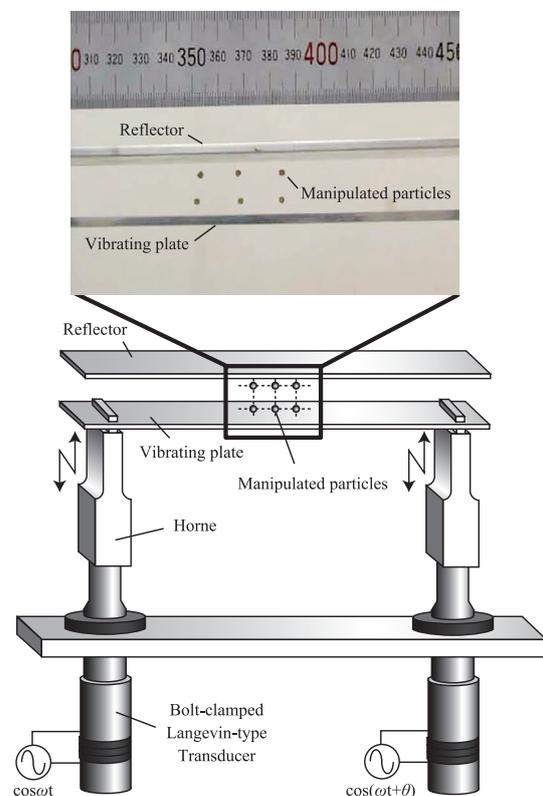


図1 超音波非接触直線搬送装置  
Fig. 1 Ultrasound noncontact transportation system.

板で挟まれた空気層が音響導波路となる。

振動板から放射される音波によって発生する振動板・反射間の音場は、板間の空気層をモデル化することによってFEMにより計算することができる。FEM解析では計算コスト削減と簡単化のため、2次元モデルを用い、反射板および空気層左右両端の境界は全て完全反射としている。FEMによって計算された音圧分布より、定在波中で微小球が受ける音響放射力分布を計算することができる。2次元格子状の超音波定在波中で微小剛体球が受ける音響放射力  $F$  は次式で表される (Nyborg W., 1978)。

$$F = VD \nabla \bar{K}_E - V(1 - \gamma) \nabla \bar{P}_E$$

$$D = \frac{3(\rho - \rho_0)}{2\rho + \rho_0}$$

ここで  $V$  は微小剛体球の体積、 $\rho$  は微小剛体球の密度、 $\rho_0$  は空気の密度、 $\gamma$  は空気と剛体球の圧縮率の比、 $\bar{K}_E$  は運動エネルギー密度の時間平均、 $\bar{P}_E$  はポテンシャルエネルギー密度の時間平均、 $\nabla$  は勾配を表す演算子である。 $K_E$  および  $P_E$  は次式で表される。

$$K_E = \frac{1}{2} \rho_0 v^2$$

$$P_E = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho_0 c^2}$$

ただし  $v (= j/\omega\rho_0 \cdot \text{grad}p)$  は粒子速度、 $c$  は空気中の音速である。FEMによって計算された音圧振幅  $p$  の分布を上式に代入することにより、定在波音場中の微小球体に働く音響放射力分布を計算することができる。図2は周波数 22.5 kHz で振動板を駆動した場合の振動板・反射板の音圧振幅分布 (コンター図) および音響放射力分布 (ベクトル図) である (計算

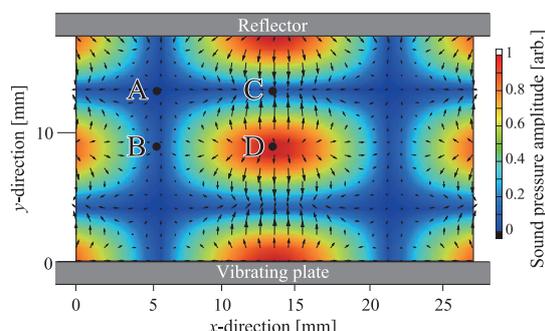


図2 板間の音圧と音響放射力分布  
Fig. 2 Distributions of the sound pressure and the acoustic radiation force between the plates.

モデル中央の長さ 27 mm の範囲のみを表示している)。同図より垂直 (図中  $y$  方向)、水平方向 ( $x$  方向) にそれぞれ波長約 17, 33 mm の格子状の超音波定在波が形成されていることがわかる。また、放射力のベクトルは格子状定在波の音圧の腹 (音圧振幅が極大となる位置) である点 D と、水平および垂直軸方向のそれぞれの節線が交わる点 A から遠ざかる方向に分布する。一方、点 A から水平および垂直軸方向にそれぞれ 1/4 波長の距離の点 B, C に向かう方向に放射力は分布する。この内点 C に向かう放射力の大きさは、点 B に向かうそれに比べて大きく、微小物体に働く重力が垂直下向きであることを考えると、定在波腹部の点 D からの斥力が大きいことを考えると、物体の捕捉には点 C の方が安定している。実際図1に示した様に、微小物体は点 C に相当する位置に、水平および垂直方向にそれぞれ半波長ごとに等間隔で捕捉することができる。

物体が浮揚した状態で、二つの振動子の駆動位相差を制御することにより、物体を非接触で搬送することが可能である。図3は駆動位相差  $\theta$  を変化した際の捕捉粒子と音圧分布を振動板幅方向からスキャニングレーザードップラー振動計 (LDV) で観測した様子である。LDVはその名の通り、本来光のドップラー効果によって物体の振動速度を測定する装置であるが、媒質中の音波伝搬、すなわち媒質の圧力変動に伴う光の屈折率の変化を測定することも可能である (Nakamura K., 2001)。図3では色が異なる振幅値はお互い逆相であること表示しており、FEM結果 (図2) と同じ格子状定在波中に、径

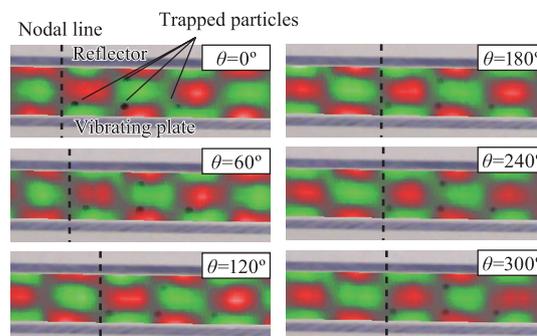


図3 駆動位相差の変化による音圧分布の変化と物体の非接触搬送の様子  
Fig. 3 Distributions of the sound pressure with several driving phase differences and the noncontact transportation of small particles.

解説

数 mm のポリスチレン粒子が水平方向節線上に捕捉されていることがわかる。振動子間の駆動位相差  $\theta$  を変化させると、振動板上に発生するたわみ振動の位置は図中右側に移動し、それに伴い板間の空中定在波も右側に移動することにより捕捉粒子は非接触で同方向に移動する。図 4 は駆動位相差と粒子の移動距離の関係であり、垂直方向 (y 方向)、水平方向 (x 方向) の実測値と FEM による計算値を併せて示している。位相差の変化に対する水平方向への粒子の移動距離は、実測値、計算値ともほぼ比例関係であり、その傾きは 0.046 mm/deg である。すなわち粒子は位相差  $360^\circ$  で定在波の水平方向の波長の 1/2 の距離だけ移動する。また粒子は水平方向移動に伴い、垂直方向にもわずかに上下に移動する (ポリスチレン粒子の場合最大振れ幅は 0.44 mm)。これは駆動位相差変化によって、板の平均的な振動振幅が低下し、音響放射力の垂直方向成分が減少するためである。

二つの振動子の駆動位相差を変化することにより、振動板にたわみ進行波を発生することができる (Koyama D. et al., 2007)。この時、振動板・反射板間の空気層中の垂直方向には音響定在波が、水平方向には進行波が発生する。進行波音場中に微小物体が存在する場合、音響放射力によって物体は非接触で高速搬送される (Ito Y. et al., 2010)。図 5(a) は進行波発生時の音圧振幅分布と、10 ms 毎に撮影した粒子の搬送の様子を表しており、音場の不均一性によって粒子は幾分上下方向に揺れ動くものの、音圧の水平方向接線に沿って高速搬送されることがわかる。図 5(b) は粒子の移動速度の時間変化であり、

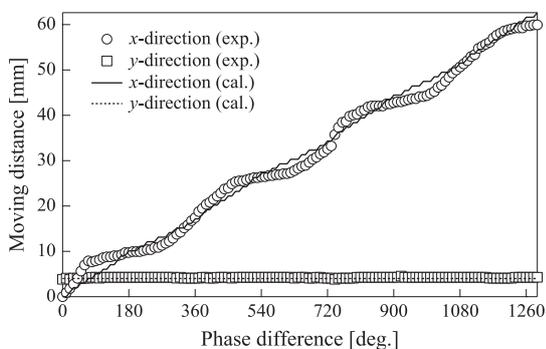


図 4 駆動位相差と物体の移動距離の関係  
Fig. 4 Relationship between the driving phase difference between two transducers and the moving distance of a small particle.

粒子に働く水平方向の放射力とそれとは逆向きに働く空気抵抗によって、終端速度は 410 mm/s となる。また粒子の質量 (0.3 mg) と速度変化の過渡応答より、音響放射力による粒子に働く推力は  $9.0 \times 10^{-7}$  N と見積もられる。

超音波による非接触搬送は固体のみならず、液体にも応用することができる (Ding M. et al., 2012)。搬送液体としてエタノールを用いた場合、図 6 に示す様に水平方向に半波長毎の等間隔に液滴として捕捉することができる。また、固体の場合と同様に、振動子間駆動位相差を変化させることにより、液滴を非接触移動させることも可能である。

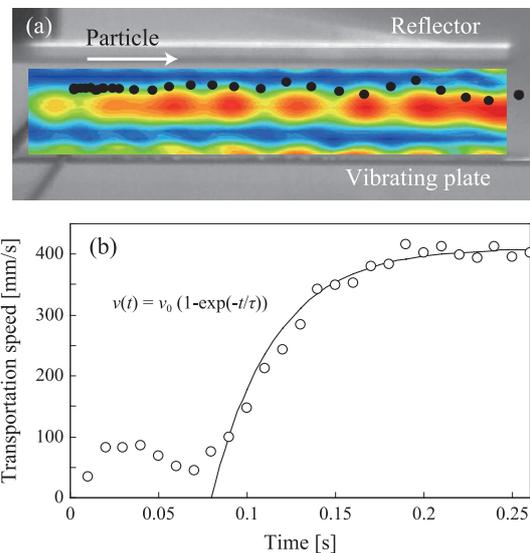


図 5 物体の高速搬送 ((a) 進行波音場と搬送の様子, (b) 搬送速度の時間変化)  
Fig. 5 High-speed transportation of a small object. (a) Sound pressure distribution and (b) the change in the transportation speed with respect to time.

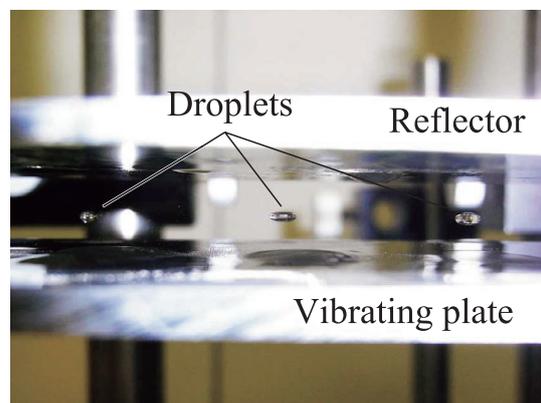


図 6 液滴の非接触搬送  
Fig. 6 Noncontact transportation of droplets.

### 3 周回搬送

超音波非接触搬送技術を様々な製造ラインに応用するためには、上記の直線搬送装置を結合した際の乗換部は重要であり、例えば図7(a)の様な非接触周回搬送技術が必要とされる (Koyama D. and Nakamura K., 2010; Kashima R. et al., 2014)。図7(b)の様に、周回搬送装置は円形振動板と反射板で構成される。振動板には厚さ0.5 mm、直径30 mmのアルミニウム製円板を用い、内径8 mm、外形14 mm、厚さ0.5 mmのリング状PZT素子を接着している。PZT素子はその駆動条件を変化させるために、円周

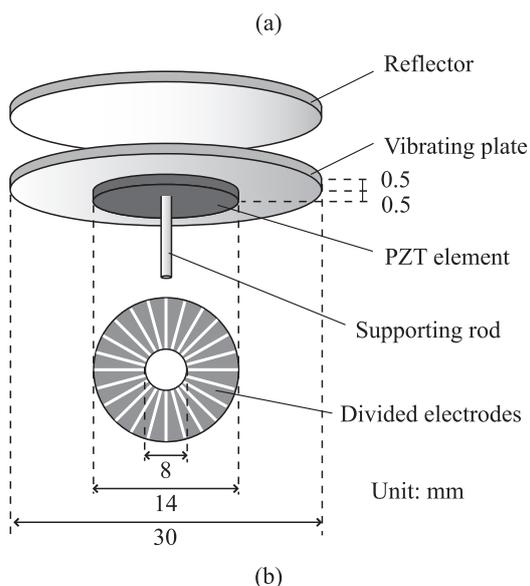
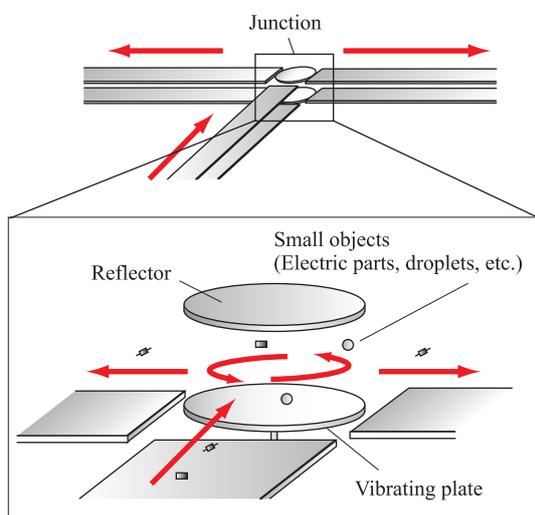


図7 周回搬送装置 ((a) 概念図, (b) 構造)  
Fig. 7 (a) Concept and (b) the configuration of the transportation in a circular trajectory.

方向に電極を分割している。円形反射板を振動板と平行に設置することにより、直線搬送と同様に、板間の空中には音響定在波が発生し、音響導波路として作用する。

表1は周波数18 kHzから100 kHzまでの円板の共振モードのFEM解析結果である。表中  $m$  及び  $n$  は振動モードの節線及び節円の数を表している (すなわち円上で振動しない部分が線状、円状に現れる)。共振周波数が高いほど節円、接線の数が増える高次の振動モードとなる。一例として、 $(n, m) = (1, 4)$  のたわみモード (47.8 kHz) のFEM結果を図8(a)に示す。

振動板に  $(1, 4)$  たわみモードを効率的に発生させるには、同図 (b) の様に圧電素子 (PZT) の分割電極の駆動条件を、たわみ振動の半波長毎に切り替える必要がある。さらに、微小物体を周回搬送するためには、同図 (b) ~ (d) の様に、分割電極の電圧駆動条件を周方向に変化させることにより、振動分布および空中の定在波を中心軸周りに回転させ、捕捉された微小物体を非接触移動する (駆動条件 “+” と “-” はそれぞれ  $V = V_0 \cos \omega t$  と  $V = -V_0 \cos \omega t$  での電圧駆動を意味している)。すなわち同図 (b) から (d) の駆動条件に切り替えることにより、振動分布は円周方向に中心軸周りに  $15^\circ$  回転することがわかる。

表1 円板の振動モード  
Table 1 Resonance vibration modes of a circular plate.

$n \backslash m$	0	1	2	3	4
0			26383	54522	92944
1			37906	69779	
2		20226	50402	97521	
3		34228	64917		
4		47817	86655		
5	18762	60366			
6	26273	73588			
7	35171	88358			
8	45429				
9	57048				
10	70065				
11	84500				

$(n, m) = (1, 4)$

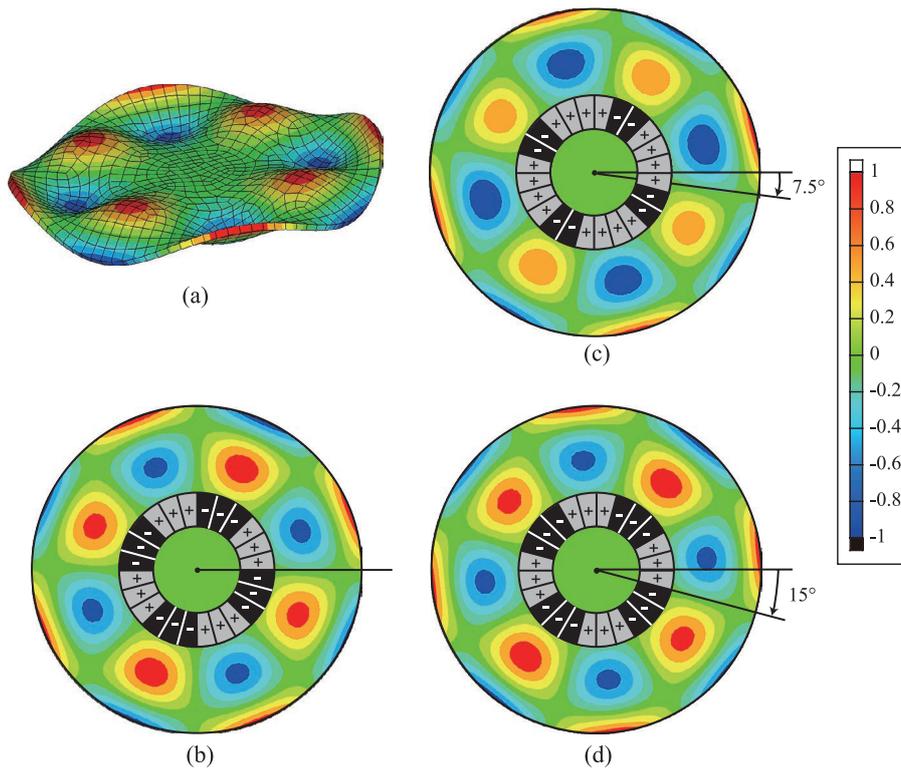


図8 (a)円板の(1,4)たわみモードと(b), (c), (d)分割電極の駆動条件  
 Fig. 8 (a) (1,4) flexural vibration mode of a circular plate and (b), (c), (d) the driving condition of the divided electrodes.

図9は二つの円板間空気層中の音圧および音響放射力分布のFEM結果である。 $r-\theta$ 平面において円周方向に定在波が励振され、その波長と節線の位置は円板振動分布のそれと一致していることがわかる。また $r-z$ 平面は半波長の定在波が励振されている。直線搬送装置の場合と同様に、音響放射力分布より物体の捕捉位置は予測可能で、物体は定在波の水平方向節線上の $(r, z)=(13\text{ mm}, 2.5\text{ mm})$ (図中点P)の位置に捕捉され、同様の点は円周方向に計8個存在する。図10は実際にポリスチレン粒子が振動板・反射板間に捕捉された様子である(反射板には透明の亚克力板を用いている)。粒子は円周方向にたわみ振動の半波長毎に等間隔で捕捉され、それらの位置はFEM結果において予測された点Pと一致している。この状態から電極の駆動条件を円周方向に切り替えることによって、粒子を非接触で円周方向に搬送することができる。図11は $15^\circ$ ずつ移動する粒子の運動軌跡を重ね合わせた写真であり、駆動条件の切替回数と粒子の円周方向への移動距離は比例する。すなわち図8(b)から(d)を1回の切替とすれば、24回の切替によって粒子は $360^\circ$ 回転する。円

周方向への物体の位置決め精度を向上させるには、圧電素子の電極分割数を増やせば良い。

#### 4 二次元搬送

2つの超音波振動子と振動板で構成される一次元搬送装置を二次元に拡張することによって、二次元非接触搬送を実現できる(Kashima R. et al., 2015)。図12(a)は二次元搬送装置であり、4つのホーン付きランジュバン型振動子を固定した矩形振動板と反射板で構成される。振動板・反射板間の空気層中に超音波定在波を発生させて、物体の二次元非接触搬送を実現するために、振動板に図12(b)の様な格子状の共振たわみモードを励振させる。振動子を2個1セットとし、1次元搬送と同じ動作原理で、振動子2セット間の駆動位相差を制御することによって、二次元平面内での $x, y$ 方向への直線搬送が実現できる(図12(c))。また4つ全ての駆動位相差を制御することにより、斜め方向への直線搬送も可能となる。

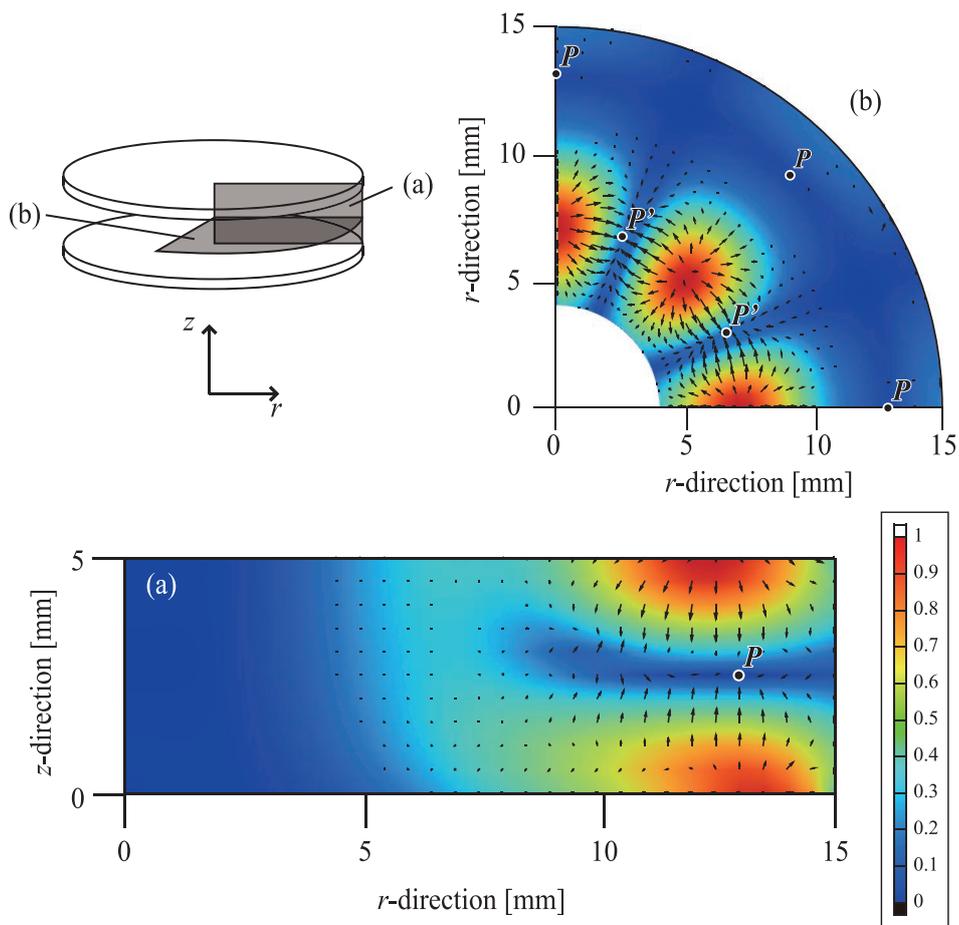


図9 円板間の音圧と音響放射力分布  
Fig. 9 Distributions of the sound pressure and the acoustic radiation force between two circular plates.

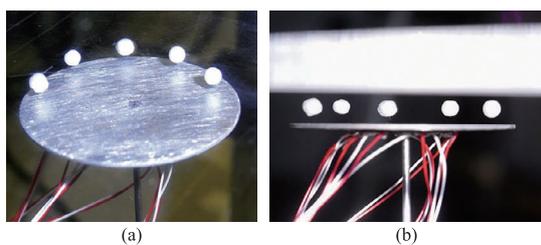


図10 円板間に浮揚する粒子  
Fig. 10 Levitated particles between the circular plates.

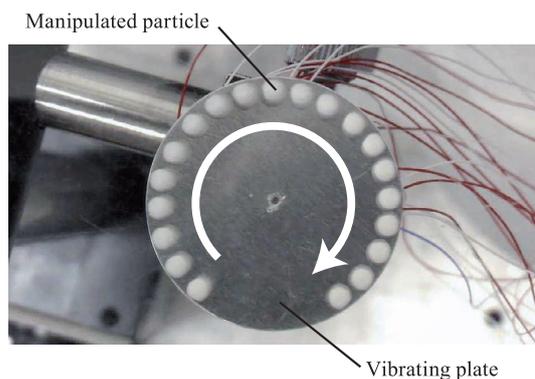


図11 円周方向に移動する粒子の様子  
Fig. 11 Transported particle in the circumferential direction.

## 5 おわりに

本稿では超音波による物体の非接触搬送について、著者らのグループがこれまでに開発した搬送装置を中心に紹介した。いずれの装置においても、超音波振動と音場を制御し、物体の空間位置を操る点で本質的には同じ技術を用いている。本技術は将来的に、精密電子部品や錠剤など振動を嫌う製品の製

造ラインへの応用のみならず、粉体のハンドリング技術にも応用可能である。また、バイオテクノロジーの分野においても、清浄な液体や細胞などの生体試料 (Mino K. et al., 2015; Tani K. et al., 2019) のハンドリング技術への展開が期待される。

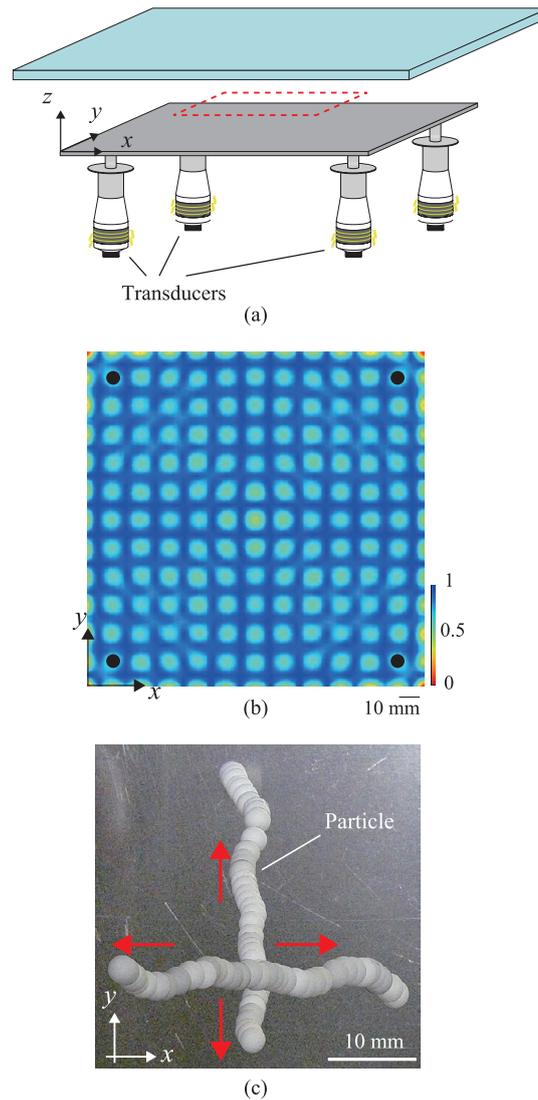


図 12 二次元搬送装置 ((a)構造, (b)板の振動モード, (c)粒子の搬送)

Fig. 12 Two-dimensional transportation system. (a) Configuration, (b) the vibration mode of the plate, and (c) a photograph of a particle manipulated in the two-dimensional plane.

## References

- Andrade M.A.B., Pérez N., Adamowski J.C., Particle manipulation by a non-resonant acoustic levitator, *Applied Physics Letters*, 106 (2015) 014101. <https://doi.org/10.1063/1.4905130>
- Chu B.T., Apfel R.E., Acoustic radiation pressure produced by a beam of sound, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72 (1982) 1673–1687. <https://doi.org/10.1121/1.388660>
- Ding M., Koyama D., Nakamura K., Noncontact ultrasonic transport of liquid using a flexural vibration plate, *Applied Physics Express*, 5 (2012) 097301. <https://doi.org/10.1143/apex.5.097301>
- Hoshi T., Ochiai Y., Rekimoto J., Three-dimensional noncontact manipulation by opposite ultrasonic phased arrays, *Japanese Journal of Applied Physics*, 53 (2014) 07KE07. <https://doi.org/10.7567/jjap.53.07ke07>
- Ito Y., Koyama D., Nakamura K., High-speed noncontact ultrasonic transport of small objects using acoustic traveling wave field, *Acoustical Science and Technology*, 31 (2010) 420–422. <https://doi.org/10.1250/ast.31.420>
- Kashima R., Koyama D., Matsukawa M., Two-dimensional noncontact transportation of small objects in air using flexural vibration of a plate, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 62 (2015) 2161–2168. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.>

- 2015.006998
- Kashima R., Murakami S., Koyama D., Nakamura K., Matsukawa M., Design of a junction for a noncontact ultrasonic transportation system, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 61 (2014) 1024–1032. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2014.2998>
- Koyama D., Ide T., Friend J.R., Nakamura K., Ueha S., An ultrasonically levitated noncontact stage using traveling vibrations on precision ceramic guide rails, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 54 (2007) 597–604. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2007.282>
- Koyama D., Isago R., Nakamura K., Ultrasonic variable-focus optical lens using viscoelastic material, *Applied Physics Letters*, 100 (2012) 091102. <https://doi.org/10.1063/1.3688937>
- Koyama D., Nakamura K., Noncontact ultrasonic transportation of small objects over long distances in air using a bending vibrator and a reflector, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 57 (2010) 1152–1159. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2010.1527>
- Koyama D., Nakamura K., Noncontact ultrasonic transportation of small objects in a circular trajectory in air by flexural vibrations of a circular disc, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 57 (2010) 1434–1442. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2010.1562>
- Kozuka T., Yasui K., Tuziuti T., Towata A., Iida Y., Noncontact acoustic manipulation in air, *Japanese Journal of Applied Physics*, 46 (2007) 4948–4950. <https://doi.org/10.1143/jjap.46.4948>
- Mino K., Imura M., Koyama D., Omori M., Kawarabata S., Sato M., Watanabe Y., Meshless bubble filter using ultrasound for extracorporeal circulation and its effect on blood, *Ultrasound in Medicine and Biology*, 41 (2015) 465–471. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2014.09.011>
- Nakamura K., Sound field measurement through the acousto-optic effect of air by using laser Doppler velocimeter, *Technical Digest CLEO/Pacific Rim 2001 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (Cat No01TH8557)*, 1 (2001) 154–155. <https://doi.org/10.1109/CLEOPR.2001.967773>
- Nyborg W., *Physical principles of ultrasound*, in *Ultrasound: Its Applications in Medicine and Biology*, Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Scientific Publishing company, 1978, 52.
- Tani K., Fujiwara K., Koyama D., Adhesive cell patterning technique using ultrasound vibrations, *Ultrasonics*, 96 (2019) 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.03.018>

〈著者紹介〉



小山 大介 Daisuke KOYAMA

〔経歴〕 2005年同志社大学大学院工学研究科博士後期課程修了（博士（工学））。2005年東京工業大学精密工学研究所助手，2011年同准教授，2012年同志社大学理工学部准教授。2018年より現職。

〔専門〕 超音波工学と計測工学。近年は特に、圧電材料を利用したアクチュエータ・センサ、マイクロバブルを用いた医用超音波技術，強力超音波による物体のハンドリング技術について研究を行っている。

〔連絡先〕 dkoyama@mail.doshisha.ac.jp