

超音波定在波音場における粒子挙動マニピュレーション —閉空間にたわみ振動を適用した場合—

鯉沼 和希, 河府 賢治*

Manipulation of Particle Behavior in Ultrasonic Standing Wave Field —Case of Application of Flexural Vibration Plate for Closed Space—

Kazuki Koinuma and Kenji Kofu*

Received 17 December 2024; Accepted 13 March 2025

The purpose of this study is to investigate the effects of acoustic streaming and acoustic radiation force on particles motion in an ultrasonic standing wave. A flexural vibration plate with 4 nodes was designed, and it was shown that the amplitude at the antinode is proportional to the voltage. This means it is possible to conduct experiments with any amplitude. After confirming that a standing wave field was generated in closed space, an experiment was carried out to visualize acoustic streaming. Eight vortices were observed in the horizontal direction, indicating a Rayleigh acoustic flow. In addition, a vortex in perpendicular direction against the plate was generated when the height between vibration plate and acrylic surface was set at half wavelength. Then two vortexes were obtained at a wave length for the height. Simulations for acoustic pressure and streaming agreed with this experimental result. Finally, simulations on particle motion showed that acoustic flow dominates when particle diameter is less than 20 μm . On the other hand, the motion of over 20 μm particle is influenced by acoustic radiation force.

Keywords: Ultrasonic vibration, Acoustic streaming, Acoustic standing wave, Flexural vibration, Manipulation of particle.

1. 緒 言

近年、マイクロマニピュレーションによる細胞操作や、化学材料などでの原料微粉体の生成など、さまざまな分野で微小物体を操作する技術が求められている[1]。これら微小物体は接触でのマニピュレーションが難しく、異物混入のリスクを考慮すると非接触のマニピュレーションが望ましい。非接触のマニピュレーションは電気泳動や磁力を利用した方法が挙げられるが、これらは対象となる粒子が導電性物質に限られるなどの問題点がある。

そこで、音波を使用したマニピュレーションが実現できれば対象物質に制限がなく汎用性が高いため、その応用への期待は大きい。小塚らにより、超音波定在波音場内の物体に音響放射力が作用することが示されている[2]。音響放射力は、定在波の節の位置方向に物体を動かす作用であり、この作用を使用すれば、非接触でのマニ

ピュレーションが可能であるといえる。大内らは、2枚の平板を平行に設置して粒子径や音圧、流速などの条件を変えながら超音波振動による粒子挙動可視化実験を行った。その結果、数十 μm 程度の粒子径の挙動は節方向へ移動させることができたが、数 μm 程度の粒子では蛇行している挙動を示した[3]。これは音響流の影響が考えられる。小塚らにより、超音波音場内においてRayleigh型音響流が発生することが報告されており、またMullerらによると、液体中において超音波音場内の粒子挙動が粒子径により変化していることが示されている[4]。したがって、数十 μm の粒子は流れの中でも音響放射力を利用することでマニピュレーションが可能になるといえるが、微小粒子の場合は、音響放射力が小さく、同時に生じる音響流の影響を受けると考えられる。つまり、微小粒子の非接触挙動制御のためには音響流の解明が必要である。

Maramizonouzらは、流体内の微粒子、液滴に対する音響流の効果を調べ、音響流による作用で粒子挙動の制御が可能であることを示している[5]。液体内の微粒子・液滴の操作に対して音響流は有効であるということが示されているが、気流中の粒子に対する検討はされておらず不明である。またZhuらは、音響流の性質を使用し、生細胞

日本大学大学院 理工学研究科 機械工学専攻
(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)
Graduate School of Science & Technology, Department of Mechanical Engineering, Nihon University
(1-8-14 Kanda Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308, Japan)
* Corresponding Author kofu.kenji@nihon-u.ac.jp

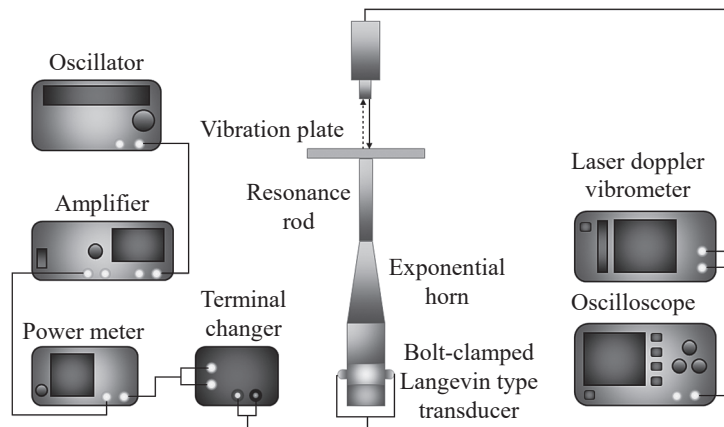


Fig. 1 Experimental apparatus (Vibration mode)

からの過酸化水素の検出について調べた[6]。以上のことから音響流の活用方法として生細胞の制御がメインとなっており、微小区間での活用を研究していることがわかる。したがって液体内の音響流の性質を使用している研究が多く、気相中で粉体に対しマニピュレーションを行う研究は少ない。

そこで本研究では、超音波印加によりたわみ振動する振動板を設計・製作し、振動振幅測定により設計通りの振動モードが現れるか確認する。そして、閉空間内において超音波振動を与えることにより、超音波定在波音場を形成されているか確認し、音響流の可視化実験を行う。また、シミュレーションを用いて音圧分布および音響流の再現を試み、実験と比較することで計算の妥当性を評価する。さらにシミュレーションで計算した流れに粒子を投入して粒子挙動を解析し、粒子径に対する音響放射力および音響流の影響を調べる。

2. 実験装置および実験方法

2.1 超音波振動板の振動モード

Fig. 1 に本研究で使用する超音波発生装置を示す。発振器により、所定の周波数の出力電圧 V を発生させる。この V を増幅器により増幅させ、ボルト締めランジュバン型振動子（日本特殊陶業製、D45520）に入力する。これにより発生した超音波をエクスポネンシャルホーンで増幅し、半波長共振棒を介して振動板に伝達し、超音波振動を発生させる。ここで半波長共振棒は材質がジュラルミン（A2017）、直径 12 mm の円柱型である。長さは、振動板に最大の振幅を伝達するため 124 mm とした[7]。

本研究で用いた振動板は、20.1 kHz で共振するように設計されている。そのため、発振器で発生させる電圧の周波数 f を 20.1 kHz として実験を行った。また材質はジュラルミン（A2017）で、寸法は 12×90×6 mm である。なお振動板は、Fig. 2 に示すように振動の節が 4 つ現れる振動モードになるよう Lucas[8]や Wei[9]らと同様に有限要素法（FEM）ベースの汎用物理シミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics で計算をして設計した。計算した結果を Fig. 3 に示す。

振動板に生じる各位置における振動振幅 A_m を測定する

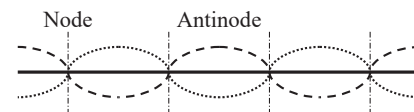


Fig. 2 Mode of flexural vibration

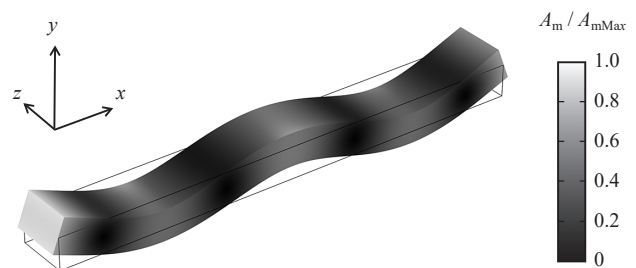


Fig. 3 Vibration mode (Simulation)

ため、レーザードップラ振動計（小野測器製、LV-1800）を用いた。なお、測定可能周波数は 0.3 Hz～3 MHz、速度レンジ R_{LDV} は 1.0 (m/s)/V である。発振器の出力電圧 V を超音波振動子に入力して振動板に超音波振動を発生させ、振動板表面にレーザードップラ振動計のレーザーを照射し、オシロスコープにより実効値電圧 V_{LDV} を測定する。この V_{LDV} と Eq. (1) より A_m を求める[7]。

$$A_m = \frac{\sqrt{2} V_{LDV} R_{LDV}}{2\pi f} \quad (1)$$

本研究では $V = 2.0 \text{ V}_{rms}$ とし、長手方向および短手方向ともに 2 mm 間隔で移動させて A_m を測定した。

2.2 音圧測定

Fig. 4 に音圧測定実験の装置図を示す。空間内に生じる音圧を測定するため、レーザードップラ振動計（小野測器製、LV-1800）を側面から垂直に照射し、対面に鏡を置くことでアクリル容器内の音圧 P を測定する。オシロスコープに表示される実効値電圧 V_{LDV} と音圧 P には以下のような関係がある[10]。

$$P = \frac{n}{n-1} \frac{c^2 \rho}{2\pi f l} \sqrt{2} V_{LDV} R_{LDV} \quad (2)$$

n , c , ρ , l はそれぞれ空気の屈折率、音速、空気の密

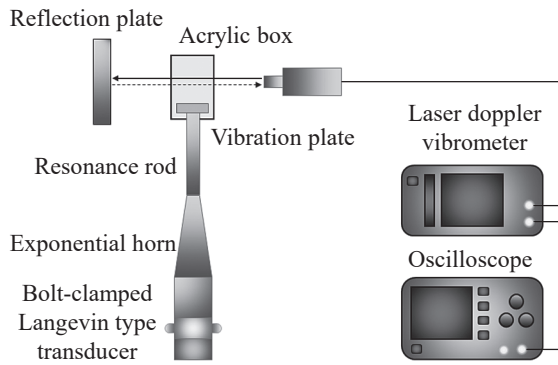


Fig. 4 Experimental apparatus (Sound pressure distribution)

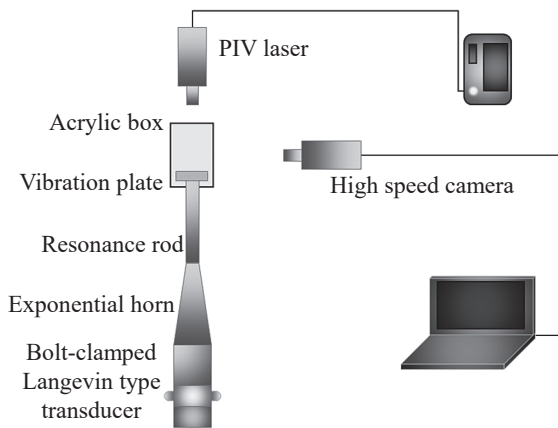


Fig. 5 Experimental apparatus (Visualizing acoustic streaming)

度、レーザーが相互作用する長さである。 n の値は空気屈折率 1.0002764 とした。なお、出力電圧感度は 0.01 (m/s)/V 、測定可能周波数は $0.3 \text{ Hz} \sim 3 \text{ MHz}$ である。本研究では $A_m = 6 \text{ }\mu\text{m}$ とし、垂直方向および水平方向ともに 2 mm 間隔で移動させて V_{LDV} を測定した。また振動板と反射板間の高さ H は、振動により生じる音波の波長に対して半波長および一波長となる $H = 7.8, 17.1 \text{ mm}$ とした。

2.3 音響流可視化実験

Fig. 5 に音響流可視化実験の装置を示す。空間内に生じる音響流を測定するため、PIV レーザー（カトウ光研製、KLD-G1）を使用してシート光を作り、高速度カメラ（カトウ光研製、k5）を用いて撮影した。なお、フレームレートは 500 fps とし、投入粒子は線香の煙とした。

本研究では A_m を $4 \text{ }\mu\text{m}$ から $10 \text{ }\mu\text{m}$ まで $2 \text{ }\mu\text{m}$ ごとに撮影を行い、FlowExpert64 を用いて解析を行った。

2.4 解析

シミュレーションで音響流の再現を行うため、有限要素法シミュレーションソフトウェア COMSOL Multiphysics で計算を行う。物理モデルに対し任意のインターフェースを使用することで、その物理モデルにあった方程式で解析を行うことができる。またドメインで任意の物理法則を計算内に導入することができる。計算方法は Muller らと同様の計算を行う[4]。まず初めに、空間内の音圧分布を計算し、その結果を入力値として用い音響流を計算

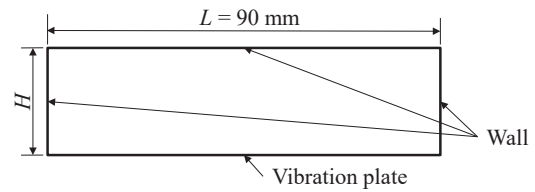


Fig. 6 Calculation area

し、実験結果と比較することでシミュレーションの妥当性を確かめる。その後、粒子を空間内に投入し、粒子径による挙動の違いを調べる。解析領域を Fig. 6 に示す。

音圧分布の計算では熱粘性音響インターフェースを使用し、Fig. 6 の Vibration plate と示した境界に Eq. (3) の振動速度を与え、たわみ振動を再現する。

$$v = A_{m\text{Max}} \times i\omega \times \cos \frac{n\pi x}{L} \times e^{i\omega t} \quad (3)$$

ω は角振動数、 n は節数、 x は振動板端からの距離、 L は振動板の長さを表す。高さ H は、定在波音圧分布となるよう実験と同様にした。また $A_{m\text{Max}}$ は振動板全体での最大の A_m であり、計算される音圧 P が実験の音圧測定と一致する値とする。

音響流の計算では乱流 k- ϵ インターフェースを使用し、音圧分布の計算結果を弱形式ドメインを用いて連続の式および NS 方程式に入れて定常で計算を行った。また、Vibration plate に Eq. (4) のように stokes drift を設定する[4]。

$$u_2 = - \left\langle \left(\frac{u_1}{i\omega} \cdot \nabla \right) u_1 \right\rangle \quad (4)$$

粒子挙動計算では、流体流れ粒子追跡インターフェースを使用し計算した。抗力ドメインで音響流の計算結果を使用するのに加え、音響泳動放射力ドメインで音響放射力 F^{rad} を Eq. (5) より与え計算する[11]。

$$F^{\text{rad}} = -\pi a^3 \left[\frac{2\kappa_0}{3} \text{Re}[f_1^* p_1^* \nabla p_1] - \rho_l \text{Re}[f_2^* v_1^* \cdot \nabla v_1] \right] \quad (5)$$

投入する粒子は、水滴とし、粒子直径 $d_p = 1, 2, 6, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200 \text{ }\mu\text{m}$ とする。トレランスを 1.0×10^{-5} とし、計算は 2.0 s まで行った。トレランスとはタイムステップのことで 1 回の解析あたりに進む時間間隔のことである。また粒子投入について、 1 mm 間隔で投入を行い、半波長では 910 個、1 波長では 1620 個投入した。

また、凝集状況を確認するため、粒子挙動計算で得られた粒子軌跡を参照し、振動印加から 2.0 s 後において約 1 mm 四方で切られた各位置のメッシュの粒子濃度を算出する。

3. 実験結果および考察

3.1 超音波振動板の振動モード

振動モードに関して製作した振動板とシミュレーション結果を比較する。最大振幅 $A_{m\text{Max}}$ と各観測点における振幅 A_m との比を取り、Fig. 7 に示す。Fig. 7 より長手方

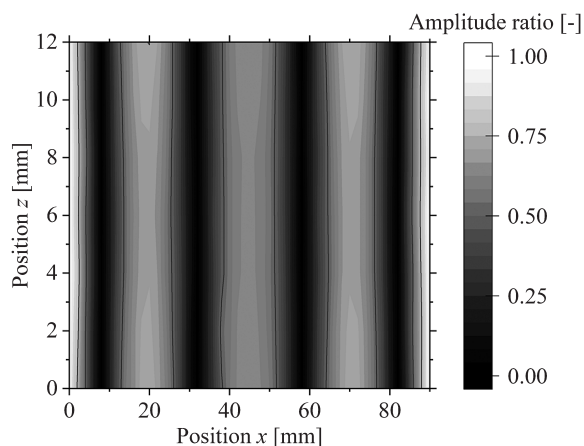


Fig. 7 Vibration mode (Experiment)

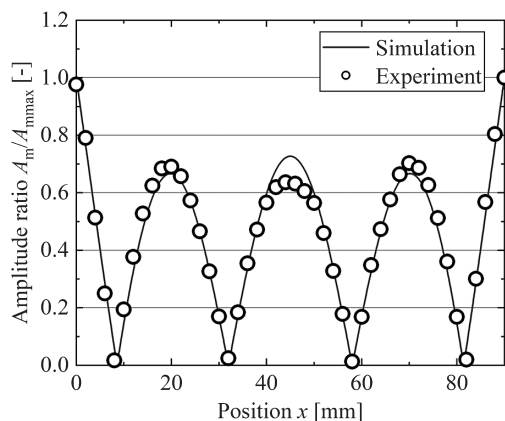


Fig. 8 Vibration mode ($z = 6$ mm)

向に4つの節が存在することがわかる。さらに、腹における振幅比がいずれも0.6以上であり、いずれの振幅も同等であるといえる。また、 $z = 6.0$ mmにおける振幅比を実験とシミュレーションで比較した結果をFig. 8に示す。Fig. 8よりシミュレーションと同様の振動が発生していることが確認できる。またFig. 3およびFig. 7より、奥行き方向に対してもシミュレーションおよび実験でモードがないことがわかる。したがって同一の振動であると考えられる。

次に、発振器の出力電圧に対する振幅の変化をFig. 9に示す。 A_m は腹の位置である $x = 20, 44$ mmにおいて V に対して比例して増加していることがわかる。また節の位置である $x = 8, 32$ mmでは A_m は変化しないことがわかる。

以上の結果より、シミュレーション通りの振動モードが得られたことから、本振動板を用いて音圧測定および音響流可視化実験を行う。

3.2 音圧測定および音響流可視化実験

音圧分布に関して半波長における結果をFig. 10に、1波長における結果をFig. 11に示す。Fig. 10およびFig. 11より、超音波定在波が生成できていることが確認できた。また長手方向に対し節の数が、たわみ振動板の節の数と一致していることがわかる。さらに、実験とシミュレー

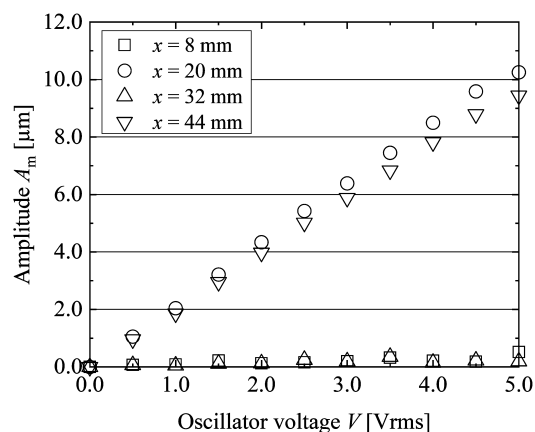


Fig. 9 Relation of oscillator voltage and amplitude ($z = 6$ mm)

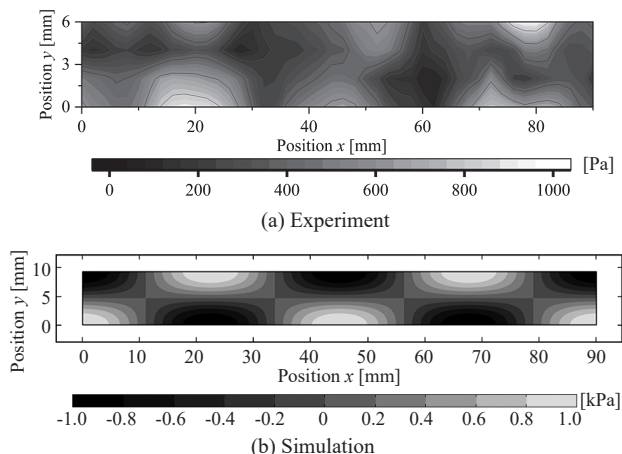


Fig. 10 Sound pressure distribution ($1/2$ wavelength)

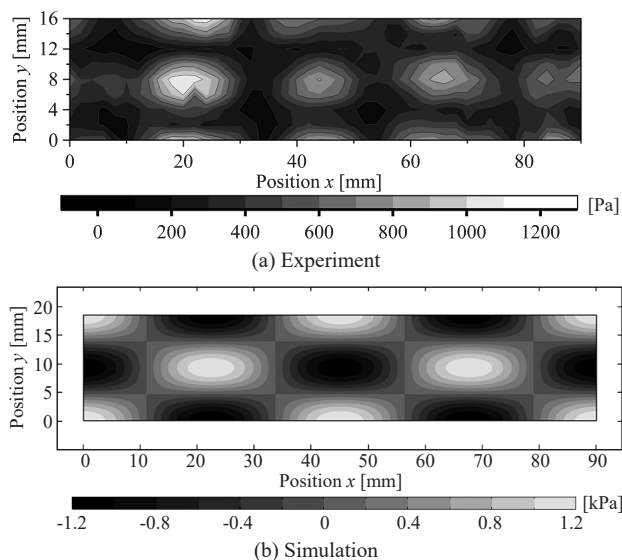


Fig. 11 Sound pressure distribution (1 wavelength)

ションで長手方向の節の数が一致しており、高さ方向の節についても各条件で同数生成できていることがわかる。したがって、シミュレーションでは実験と同様の音圧分布を得ることができた。

音響流可視化に関して半波長の結果をFig. 12に、1波

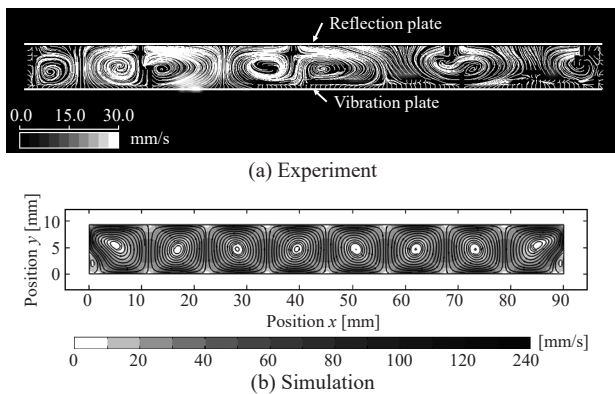


Fig. 12 Streamline analysis ($\frac{1}{2}$ wavelength)

長の結果を Fig. 13 に示す。Fig. 12 および Fig. 13 より、実験およびシミュレーションともに渦の数は長手方向に8つ発生していることがわかる。この結果から、Rayleigh型音響流が発生していることがわかる。また、高さ方向に対しては、半波長のときは1つ、1波長のときは2つであることがわかる。1波長で渦が二分される原因は、高さ方向での中間点において音圧が高くなるためであると考えられる。音圧が高くなると力学的ポテンシャルエネルギーが高くなり、音響流の流れが二分されると考えられる。さらに Fig. 12 および Fig. 13 より、シミュレーション結果の方が規則的な渦になっていることがわかる。Fig. 7 および 8 より、実験における振動板の最大振幅は腹の位置により多少異なっており、シミュレーションのような理想的な振動条件で実験が行えていないことがわかる。さらに、特に音響流は振動板と反射板の平行度の影響を受けやすいため、実験においてこれらが影響し、渦が崩れている箇所が生じたと考えられる。

また、実験とシミュレーションで音響流の最大流速を比較したものを Fig. 14 に示す。Fig. 14 より流速は2次関数的に増加していることがわかる。音波の速度 u_1 とすると、音響流の単位質量あたりの駆動力 F は $F = -\nabla \cdot \langle u_1 u_1 \rangle$ となる[12]。したがって音響流の駆動力は音速 u_1 の2乗の量が

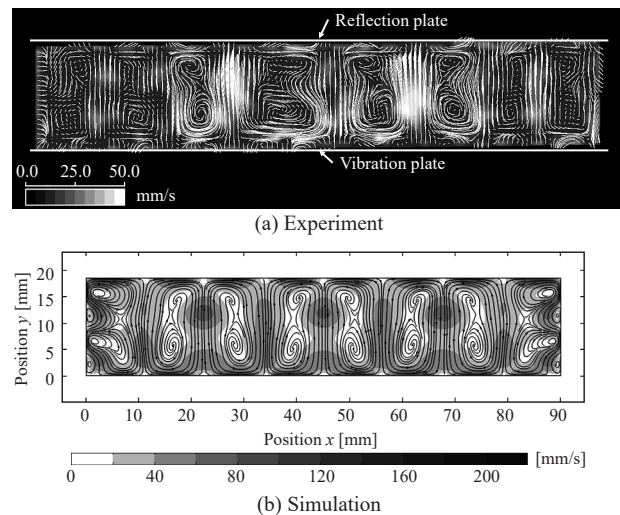


Fig. 13 Streamline analysis (1 wavelength)

駆動力となっていることがわかる。またシミュレーションでの音圧と音速の関係を Fig. 15 に示す。音速と音圧は比例関係であることがわかる。したがって、音圧に対し音響流の速度は2次関数のように増加していると考えられる。また実験とシミュレーションの比較を行うと、どちらも同様に速度が上昇していることがわかる。実験とシミュレーションを比較し速度の差が発生しているが、これは音響流の計算を行う際、連続の式およびナビエ・ストークス方程式を使用して計算を行っており、熱の考慮をしきれていないため、実験とシミュレーションで差が発生したと考えられる。以上の結果からシミュレーションの結果が妥当であることがわかる。

3.3 粒子挙動解析

一波長となる高さ、音圧 $P = 1185 \text{ Pa}$ での粒子軌跡を Fig. 16 に示す。Fig. 16 より、 $d_p = 20 \mu\text{m}$ 以下では音響流の作用が大きく循環する軌跡が現れ、 $d_p = 80 \mu\text{m}$ のような大きな粒径に対しては音響放射力の作用が大きくなり、腹の間の節に留まる傾向を示した。阿部らは、液滴を音響定在波内部に液滴を入れた際、音圧の節の位置に留ま

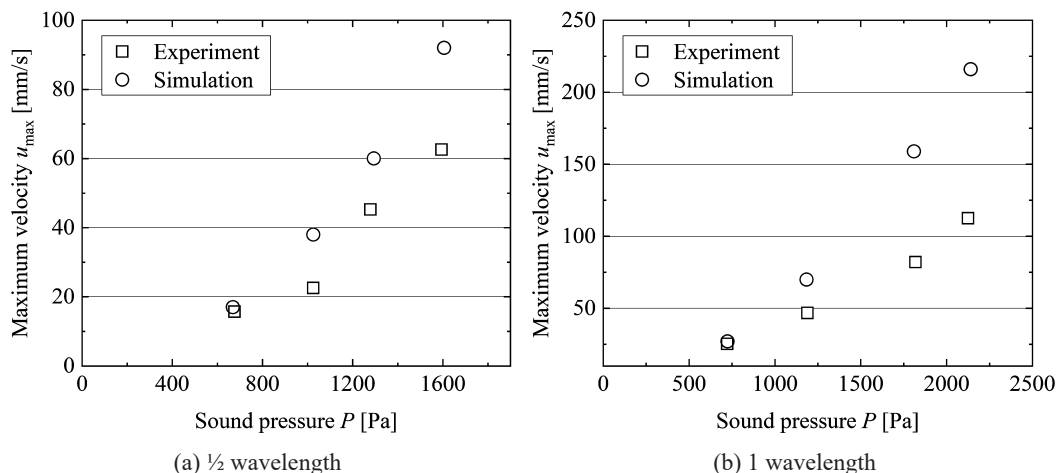


Fig. 14 Relation of sound pressure and velocity

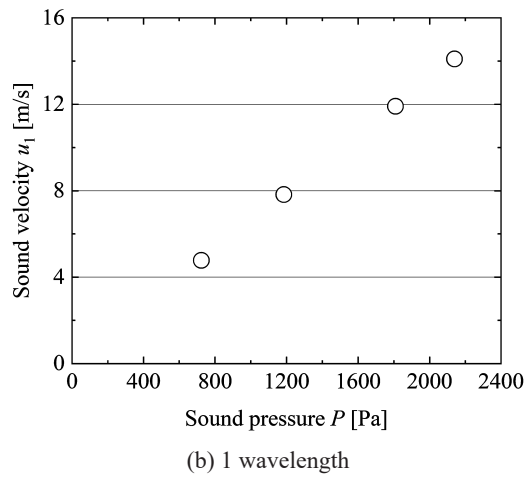
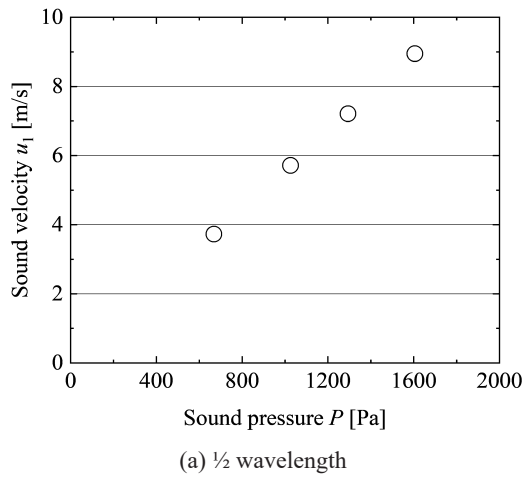


Fig. 15 Relation of sound pressure and sound velocity

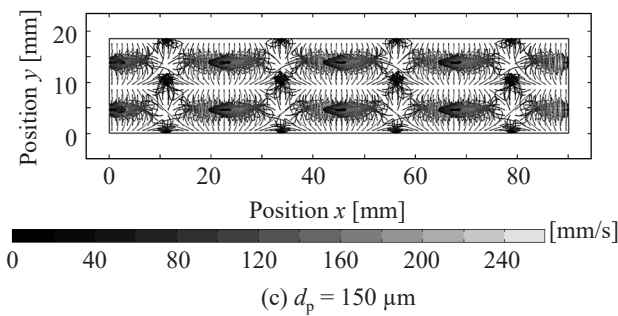
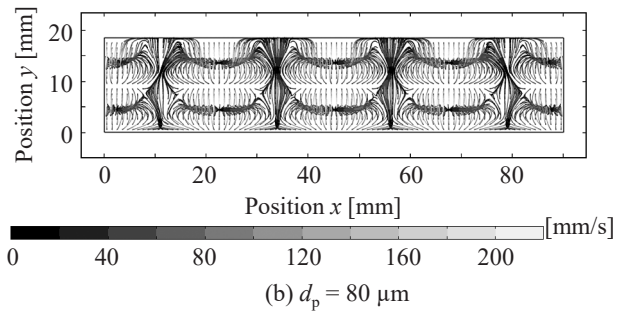
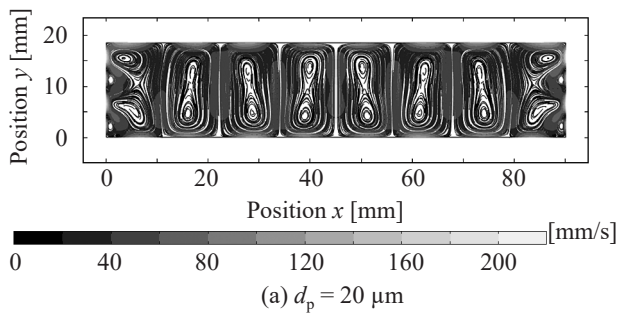


Fig. 16 Particle behavior simulation

る傾向を示しており[13], 本研究のシミュレーションでも同様の傾向を示したことから粒子挙動計算結果は妥当であると考えられる。

一波長となる高さ, 音圧 $P = 1185 \text{ Pa}$ での濃度計算結果を Fig. 17 に示す。また, この図において, 音圧ごとによる濃度の最大値と粒子径との関係を Fig. 18 に示す。Fig. 18 より, $d_p = 30 \mu\text{m}$ までは音響流の作用が大きいこ

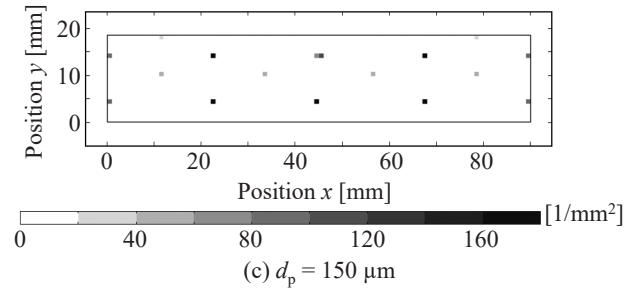
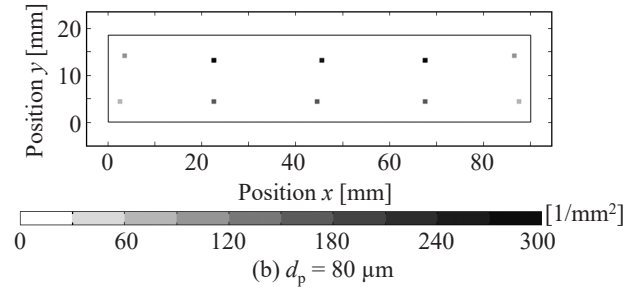
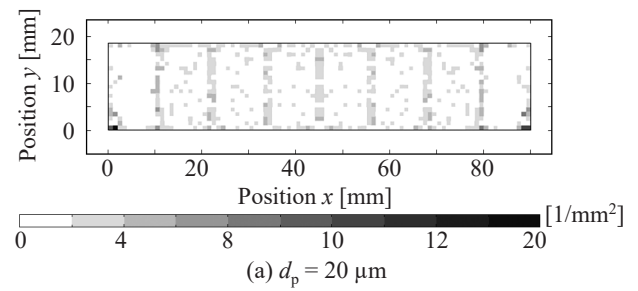


Fig. 17 Particle concentration simulation

とから濃度が低いことがわかる。半波長と比べて一波長の条件の方が濃度が大きい, これは Fig. 17 より音響流の作用を受け壁面付近での濃度が高いためと考えられる。また d_p が大きくなると音響放射力の作用が大きくなっていくため濃度が上昇するが, $d_p = 80 \mu\text{m}$ 以上になると濃度が減少することがわかる。音響放射力は Eq. (5) に示すように体積の大きさで作用する量に変化する。どの粒子径においても音響流の影響は受けるが, 粒子径が大きい方が音響放射力の影響が支配的になる。したがって, Fig.

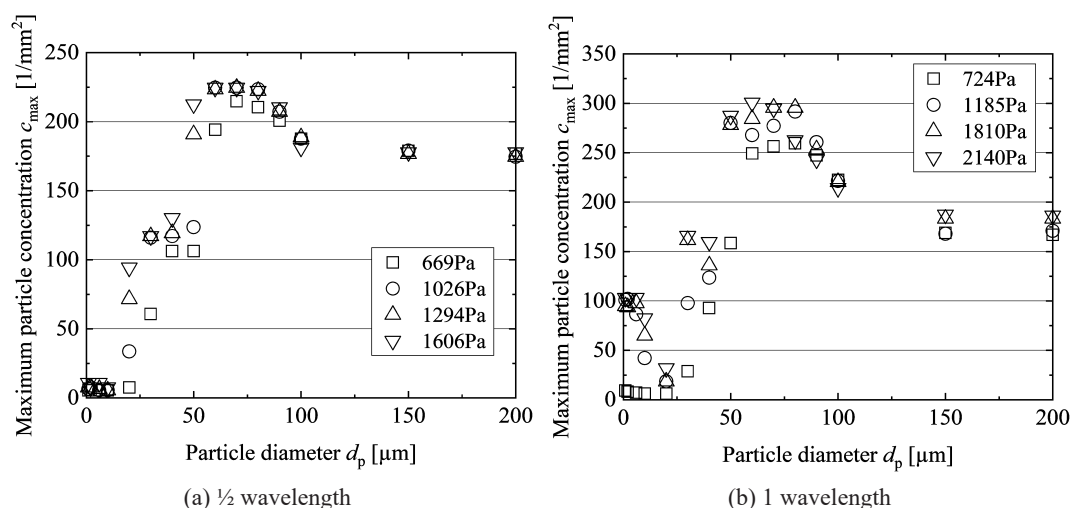


Fig. 18 Relation of particle concentration and diameter

17のように節の各箇所では粒子が静止し、凝集箇所が増加することで分散してしまい、最大濃度が下がると考えられる。

4. 結 言

本実験では、閉空間でのたわみ振動による定在波音場での粒子挙動に着目し、シミュレーションおよび実験を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 長手方向に4つの腹が発生し、設計通りに振動モードが現れていた。また入力電圧と振動板振幅の間には比例関係がある。
- (2) 超音波定在波音場中では節の数に対して倍の数の渦が確認でき、Rayleigh型音響流が発生した。また高さ方向では半波長では1つ、1波長では2つとなり、節の数と同じ数の渦が発生した。これは空間内で腹があると、その場所のエネルギーが高くなることから、音響流の流れが断ち切られて二分されるためであると考え

られる。

- (3) 音響流の最大流速はシミュレーションと実験で、同様に速度が上昇していることがわかった。なお音響流の計算を行う際、連続の式およびナビエ・ストークス方程式を使用して計算を行っており、熱の考慮をしきれていないため、実験とシミュレーションで差が発生したと考えられる。
- (4) 粒子挙動シミュレーションより、30 μm以下の粒子径では音響流の影響が大きいため凝集しにくいことがわかった。また30 μmよりも大きな粒子径では音響放射力の作用が加わることで凝集できることがわかった。さらに80 μm以上の粒子径になると音響放射力の作用が支配的になることがわかった。

〔謝辞〕本研究は、ホソカワ粉体工学振興財団助成により行われた。ここに記して謝意を表す。

Nomenclature

f : frequency	[Hz]	c : sound speed	[m/s]
ω : angular frequency	[rad/s]	ρ : density	[kg/m ³]
A_m : amplitude of vibration plate	[m]	l : laser interaction length	[m]
p : sound pressure	[Pa]	d_p : particle diameter	[m]
V_{LDV} : effective voltage	[V]	a : particle radius	[m]
R_{LDV} : speed range	[(m/s)/V]	u : velocity	[m/s]
n : refractive index	[-]		

References

- [1] D. Koyama, K. Nakamura, Noncontact ultrasonic actuators, J. Acoust. Soc. Jpn. 67 (2011) 75–80.
- [2] T. Kozuka, K. Yasui, T. Tuziuti, A. Towata, Y. Iida, Measurement and calculation of the radiation force on a small object in a standing wave field, the transactions of the institute of electronics, Information and Communication Engineers J91-A (2008) 1156–1160.
- [3] K. Ouchi, K. Kofu, Control of Particle Motion with Ultrasonic Vibration, Fluid Structure Sound Interactions and Control (2015) pp. 305–311.
- [4] P. B. Muller, R. Barnkob, M. J. H. Jensen, H. Bruus, A numerical study of microparticle acoustophoresis driven by acoustic radiation forces and streaming-induced drag forces, Lab Chip 12 (2012) 4617–4627.

- [5] S. Maramizonouz, M. Rahmati, A. Link, T. Franke, Y. Fu, Numerical and experimental studies of acoustic streaming effects on microparticles/droplets in microchannel flow, *Int. J. Eng. Sci.* 169 (2021) 103563.
- [6] F. Zhu, Z. Liu, X. Wu, D. Xu, Q. Li, X. Chen, W. Pang, X. Duan, Y. Wang, Enhanced on-Chip modification and intracellular hydrogen peroxide detection via gigahertz acoustic streaming microfluidic platform, *Ultrason. Sonochem.* 100 (2023) 106618.
- [7] K. Kofu, M. Ochi, M. Takei, Y. Hirai, Influence of particle properties on friction reduction of particle mass by ultrasonic, *J. Soc. Powder Technol., Japan* 46 (2009) 330–337.
- [8] C. R. Lucas, F. d. Leon, Effects of changing material properties on vibration modes of guitar body, 2017 7th IEEE Int. Conf. Control Syst., Comput. Eng. (ICCSCE) (2017) pp. 139–143.
- [9] Z. Wei, L. K. Weavers, Combining COMSOL modeling with acoustic pressure maps to design sono-reactors, *Ultrason. Sonochem.* 31 (2016) 490–498.
- [10] K. Nakamura, Measurements of high power ultrasound in the air through the modulation in the refractive index of air, *IEICE Technical Report* 101 (2001) pp. 15–20.
- [11] P. B. Muller, R. Barnkob, M. J. H. Jensen, H. Bruus, COMSOL analysis of acoustic streaming and microparticle acoustophoresis, Excerpt from the Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Milan.
- [12] T. Kamakura, S. Saito, T. Tsuchiya, H. Nomura, T. Kozuka, J. Kondoh, T. Kawabe, *Nonlinear Acoustics: Fundamentals and Applications*, CORONA PUBLISHING CO., LTD. (2014) pp. 195–218.
- [13] Y. Abe, K. Hasegawa, Manipulation technology of droplet by acoustic levitation, *J. Acoust. Soc. Jpn.* 69 (2013) 591–596.