13112

超音波定在波音場の形成条件による懸濁粒子の挙動変化

Variation of Suspending Particle Motion for
Condition of Ultrasonic Standing Wave

研究代表者 Research leader: 河府 賢治 Kenji KOFU

日本大学理工学部 助教

College of Science & Technology, Nihon University, Assistant Professor

E-mail: kofu@mech.cst.nihon-u.ac.jp

抄録

超音波定在波を利用した気相中の粒子挙動制御に関し、粒子挙動を実験で確認すると共に計算を行い、計算の妥当性の確認を行った。実験とシミュレーションにおいて超音波振動による板間に生ずる定在波音場が同様の結果が得られた。しかし、水平な流路に定在波音場を形成し、粒子挙動を調べた結果、実験、シミュレーションともに重力が支配的となり音圧を2 kPa程度まで高めないで挙動に変化が現れなかった。そこで、主流方向と重力方向を同一とし、音圧による挙動変化を調べた。その結果、500 μm の発砲スチロールは節の位置に移動したが、8, 57 μm 程度の白色溶融アルミナでは音圧により節に集めることが難しいことも明らかとなった。また空気中を懸濁する微小粒子は音圧分布により生ずる音響流の影響を受けること、振動モードを変えることで音圧を高めなくても粒子挙動を制御できることも示された。

ABSTRACT

The purpose of this research is to control the particles motion in the ultrasonic standing wave. The results of simulation have been compared with experiment in order to examine the possibility of particles motion control in the air. Simulations have corresponded with experiments on acoustic pressure distribution and particle motion. However particle motion control was impossible in this experiment because radiation pressure acting on particle was poor and gravity force dominates. Then, simulation showed that the particle motion is changed if the sound pressure is increased. This means it is possible to control the particles motion by ultrasonic if high acoustic pressure is applied. Additionally particle can be collected by changing vibration mode even though maximum acoustic pressure is not changed.

研究背景と目的

平板上に粒子を均一に散布し、その平板に超音波振動を与える事で粒子が板振動の節の部分へ集まる事が分かっている (Kofu K. et al., 2009). 同様に空気中に超音波振動により定在波音場を形成することで、気相中に分散している粒子を一点に集めることができることも分かっている (Haake A. et al., 2005). このような超音波振動による粒子挙動を応用できれば、様々な問題の解決やその他の技術に活用できる。一つの例として、集塵への応用が考えられる。現在の主な集塵方法としてフィルタを用いた集塵が挙げられる。しかし、フィルタに堆積した粒子の定期的な清掃、フィルタの目詰まりなどの問題がある。また微小粒子の場合、網間を粒子が通過する可能性がある。超音波により微小粒子を任意の位置に集中、凝集させることができれば捕集しやすくなり、集塵効率の向上、または重力落下を利用したフィルタレスでの集塵が期待できる。また、微小粒子だけではなくDNAや細胞などのハンドリングへも応用でき、非接触の操作をすることで構造を傷つけることなく捕集や回収等が期待される (Morgan J. et al., 2004).

一方、空気輸送で粒子を搬送する際、パイプの壁面に粒子が接触することによる粒子破損や管内壁摩擦、壁面摩擦による輸送効率の低下等の問題がある。また、生産工程において粒子飛散は粉体ハンドリングにおける問題の一つである。そこで超音波振動により粒子挙動を制御することで、管内を浮遊している粒子の壁面接触防止や定在波音場による粉体の飛散防止効果が期待できる。

しかし、超音波振動による粒子挙動制御の研究はあまりされていない。そのため、超音波による最適な粒子ハンドリング条件はおろか、粒子種類や定在波音場の形成条件による粒子挙動の相違は明らかにされていない。粒子を用いて様々な条件での実験を行うには多大なコスト、時間が要求される。超音波による粒子挙動への

影響に関する計算が可能になれば実験行程の短縮、コストの削減並びに最適条件の提案が可能になる。しかしながら、計算のみではその結果の妥当性を証明することは難しい。そこで本研究では、空気中での超音波定在波音場内の粒子挙動を実験で確認すると共に、計算を行う。また、粒子や最大音圧等を変更し、各因子による変化を比較することで、粒子挙動制御のための最適条件の検討を行う。

1. 計算方法

1.1 放射圧

流体中に放射された超音波を物でさえぎると、超音波はその物を音の進行方向に押す力が生じる。これを音響放射力という (Miura H., 1991). 定在波音場中で半径 a の球状粒子に働く音響放射力は、 a が波長に比べて十分に小さい場合に式 (1) で与えられる。

$$\overline{F_{ac}} = V_p (D \nabla \overline{e_k} - (1-\gamma) \nabla \overline{e_p})$$

$$\left[D = \frac{3(\rho_p - \rho_0)}{2(\rho_p + \rho_0)} \quad \overline{e_p} = \frac{\overline{p_a^2}}{2\rho_0 c_0^2} \quad \overline{e_k} = \frac{\rho_0 \overline{v_a^2}}{2} \right] \quad (1)$$

ここで $V_p (=4\pi a^3/3)$ は球体積、 γ は球と媒質 (空気) の圧縮率の比、 ρ_p , ρ_0 はそれぞれ球と媒質の変動前密度を示す。 $\overline{e_k}$ は運動エネルギーの時間平均値の傾き、 $\overline{e_p}$ はポテンシャルエネルギーの時間平均値の傾きを表す。 $D \nabla \overline{e_k} - (1-\gamma) \nabla \overline{e_p}$ は力学的ポテンシャルと呼ばれ、単位体積あたりのエネルギーを表す。これを時間平均化したとき、定在波の節の位置で最小となるため、エネルギーの差により粒子が節に集中する。

1.2 数値解析

すべての流れについて質量と運動量の保存式を解いており、伝熱や圧縮性を伴う流れについてはエネルギーの保存式を追加して解く。また、流れが乱流のため、追加的に輸送方程式を解く。計算手法として有限体積法を用いるため、まずコントロールボリュームで領域を分割する。微

Table 1 Air properties

Domain fluid	Compressible air
Viscous model	Large Eddy Simulation (LES)
Specific heat [J/kg·K]	1006.43
Thermal conductivity [W/m·K]	0.0242
Viscosity [kg/m·s]	Sutherland's law
Temperature [K]	300

分方程式をコントロールボリューム Ω_{cv} で積分し、ガウスの発散定理を適用したものを式(2)に示す。

$$\int_{\Omega_{cv}} \frac{\partial \rho \phi}{\rho t} d\Omega = - \int_{A_{cv}} \rho \phi \vec{V} \cdot \vec{n} dA + \int_{A_{cv}} \Gamma (\text{grad} \phi) \cdot \vec{n} dA + \int_{\Omega_{cv}} S d\Omega \quad (2)$$

この積分領域内の圧力や速度、温度などの各物理量の保存が満足される。式(2)のように、各コントロールボリュームに線形代数方程式が構成され、反復計算あるいは一度に解かれる。

$$\frac{\rho_p \phi_p(t + \Delta t) - \rho_p \phi_p(t)}{\Delta t} \Delta \Omega = - \sum_{j=1,2,3} (\rho \phi \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \Delta A)_{\text{face } P-j} + L \quad (3)$$

計算条件の概要を表1および図1に示す。

Fig. 1 Calculation area

vibration, wall と名付けた境界は流体や粒子が流出することのない壁であり、材質にはアルミニウムを用いた。片方の板のみを振動させた計算では、安定した定在波を発生させることが難しかったため、今回計算では両方の板を振動させる。Vibration と記した境界をたわみ振動の腹の数を変更して二次元定在波振動させ計算する。なお、振動モードの定在波は式(4)で与える。

$$\Delta y = A_m \sin(2\pi f t) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \quad (4)$$

A_m は振動板の最大振幅、 t は時間、 λ は板の長手方向に対するたわみ振動の波長である。なお、板の主流方向に振動の腹の数 N が3個現われる振動モードとして、はじめ計算を行った。本研究では振動板の長さが60 mm であるため、 $N=3$ では主流方向に20 mm 間隔で振動の節が現れることになる。

また、赤色で示した inlet から流体を風速 0.5 m/s で流入し、黄色で示した outlet から流出する。板間隔は実験と同様、定在波の節が2つになるように 17.325 mm とした。投入する粒子は図1に示す板間の左端において y 軸方向に等間隔に9つ配置した。また、音響解析には非常に細かいメッシュが必要であり、定在波を計算するため板間ではメッシュを細かく生成する。しかし、計算負荷を考慮すると、精度が十分である最低限のメッシュサイズを使用すべきである。そこで、本研究では板間のメッシュサイズを $0.4 \times 0.4 \times 1$ で粒子挙動計算を行った。

2. 可視化実験方法

超音波発生装置を図2に示す。実験で用いた装置は図に示すように発振器、電圧増幅器、超音波振動子、共振棒、振動板から構成される。発振器において電圧及び周波数 f を設定し、電圧増幅器で入力電圧 v_0 が増幅される。増幅された電圧は超音波振動子に入力され、振動子内の圧電素子が微小変形することで、発振器周波数 f の振動周期で振動する。振動子の振動はエ

Fig. 2 Experimental apparatus for acoustic pressure

クスポネンシャルホーンに伝わることで増幅され、共振棒から振動板に伝わる。振動子の振動が振動板に伝わることで平板が周波数 f の周期で微小振動し、空気中で空気密度の粗密変化が生じることで超音波が放射される。

通常、局所的な音圧測定はマイクロフォンを用いて行うが、今回は板間隔が小さいために測定点を十分にとることができなかった。また、マイクロフォン自体が音圧分布を乱すことも考えられるため、LDVのレーザを板間に図のように照射し、レーザの屈折を利用することで音圧分布を測定する(Nakamura K., 2001)。振動板と垂直方向に1 mm ずつ、振動板と平行の方向に2 mm ずつ動かした。なお、本測定前に板間隔を27 mm として超音波振動を与え、1/4 インチマイクロホンに内径1 mm のプローブチューブを取り付けて局所的に測定した音圧分布とLDVによる測定結果を比較し、LDVによる測定値の妥当性を確認した。可視化実験装置概略図を図3に示す。振動板に $f=20.5$ kHz の

Fig. 3 Experimental apparatus for particle motion

超音波振動を与え、定在波音場中に粒子を投入し粒子挙動を観察する。容器に入れた粒子をモータにより拡散し、ブロワで吸引することにより板間に粒子を投入する。実験装置の真上から垂直にYVO4レーザを照射することにより可視化し、板間の粒子を高速度カメラで撮影する。撮影した粒子挙動をPTVにより分析する。

3. 研究結果および考察

3.1 音圧分布

振動板間に発生させた音圧分布に関して、LDVを用いて測定した結果を図4(a)、解析で再現したものを図4(b)に示す。なお、図4は $N=3$ となる振動モードで実験ならびに計算した結果である。図4より、計算値・実験値ともに設定通り板間の鉛直方向に節が2つある音圧分布となっており、定在波が生じていることが分かる。また、水平方向に板のたわみ振動振幅の大きい位置で音圧値が大きくなっており、節の位置で音圧に変化がないことが分かる。故に、板の表面変動により空気が圧縮されるため、振動モードに応じて音圧値が高くなることが分かり、たわみ振動のモード設定により音圧分布を調整できると言える。また、音圧分布に関して実験と解析で同様の分布となっており、計算により音圧分布を予測することができると言える。

3.2 粒子挙動

本実験装置の最大音圧630 Paを与えたときの粒子挙動実験および計算結果を図5に示す。なお、面奥行き方向に移動した粒子はシート光

Fig. 4 Acoustic pressure distribution

Fig. 5 Particle motion for ultrasonic vibration

源から外れ挙動分析できなかったため、画面左から右端まで分析できた粒子軌跡のみを示す。粒子径 $d_p = 60 \mu\text{m}$ の炭酸水素ナトリウムと $d_p = 57$ および $14 \mu\text{m}$ の白色溶融アルミナは超音波振動有無に関わらず、実験値・計算値ともに重力により落下しており、定在波音場の節の位置に捕集できないことが分かる。つまり、超音波による放射圧が不足であり重力の方が大きい。一方、 $d_p = 8 \mu\text{m}$ の白色溶融アルミナでは多少重力により落下しているが、ほぼ水平に動いていること、ならびに上記同様に超音波振動有無に関わらず挙動に変化がほぼ生じていないことが分かる。これは前述の音圧不足に加えて、粒子径の影響が考えられる。粒子径が小さいと質量が小さく重力の影響が小さくなり気流とともに水平方向に動くことになる。超音波定在波音場を通過するとき、式 (1) の通り粒子が受けられる放射圧が小さくなるため、超音波により挙動制御がし難くなり、結果として粒子軌跡に変化が見られなかったと言える。次に、 $d_p = 60 \mu\text{m}$ の炭酸水素ナトリウムにおいて、音圧を 2000 Pa へ高めた計算結果を図 6 に示す。この図も同様に、重力により落下しており、音圧分布の節の位置に粒子を留め、凝集させ捕集することは 2000 Pa に音圧を高めても本超音波定在波音場ならびに本粒子では難しいことが言

Fig. 6 Particle motion for ultrasonic vibration (Sodium hydrogen carbonate, $d_p = 60 \mu\text{m}$, $P_{\text{max}} = 2 \text{ kPa}$)

える。しかし音圧分布の腹の位置において、 630 Pa の結果と比べて粒子が落下する過程で軌跡に変化が生じていることが分かる。故に音圧を高めることで超音波により気相中の粒子挙動をある程度制御できると言える。

以上の結果より、超音波振動により粒子挙動を変えられることが分かった。しかしながら、本実験に用いた粒子の場合、粒子径が大きく重力の影響が支配的となり、超音波定在波音場による粒子挙動変化が分かり難い。そこで、図 3 に示す装置を 90 度回転させ、 $d_p = 500 \mu\text{m}$ の発砲スチロールを鉛直上方から自由落下させ、超音波振動を与え空間に定在波音場を形成させた時の粒子挙動について、シミュレーションと実験結果を比較する。図 7 より発砲スチロールでは、定在波の節の位置に動き集中している様子がシミュレーション、実験共に確認できる。つまり、重力と無関係な直角方向には 630 Pa 程度の超音波定在波音場でも粒子を動かすことができ、無重力条件下などでは 630 Pa でも十分

Fig. 7 Particle motion (Styrofoam, $d_p = 500 \mu\text{m}$)

Fig. 8 Particle motion (White fused alumina)

に粒子挙動を制御できることが分かる。同様に、 $d_p = 8$ および $57 \mu\text{m}$ の白色溶融アルミナを超音波定在波音場中に自由落下させたときの軌跡を図8に示す。図8より、白色溶融アルミナについては粒子径に関わらず多少粒子が動いているがその変化が小さく挙動制御が難しいことが分かる。前述の通り粒子径が小さい場合、粒子が受ける放射圧が小さくなるため、本実験装置により生ずる音場条件では不十分であったため、挙動変化が見られなかったと考えられる。また $d_p = 57 \mu\text{m}$ ではほぼ主流方向のみに粒子が動いているが、 $d_p = 8 \mu\text{m}$ では軌跡が板間で蛇行していることが分かる。これは音響流の影響と考えられる。

図9に $d_p = 1 \mu\text{m}$ の煙を流した時の可視化実験結果を示す。この図より、超音波振動を与えていない時は一様に動いているが、超音波振動を負荷すると流れが上下に蛇行していることが分かる。このように定在波音場が形成されることにより板間に音響流が生じ、この流れにより微小で軽い $d_p = 8 \mu\text{m}$ の白色溶融アルミナが動

Fig. 9 Acoustic flow

かされたと考えられる。つまり、粒子径が大きい方が放射圧も大きくなり超音波定在波により挙動を変化させることができるが、 $50 \mu\text{m}$ 程度の粒子においては 630 Pa では重力の方が大きく放射圧が不十分であり、放射圧により粒子を非接触で一点に集中させるには更に音圧を高める必要があると言える。一方小さい粒子では、放射圧では動き難いが質量が小さいため、音圧分布により生ずる音響流を受け、挙動が変化すると言える。そのため、粒子径により粒子挙動に与える因子が変わるため、気相中の非接触粒子ハンドリングには粒子径が大きい場合は重力と超音波振動による放射圧、粒子径が $10 \mu\text{m}$ 程度以下の小さい場合は音響流を考慮する必要があると言える。

以上の結果より、たわみ振動の腹の数が3個となり節間隔が 20 mm となる振動モードでは超音波定在波により粒子軌跡を変化させることは可能であるが、一点に粒子を集中させる、または気流中で保持することは難しいと言える。一方、本研究においては計算値と実験値とが同様の粒子挙動を示していることから、定在波音場における粒子挙動の計算が可能と言える。そこで、最後にたわみ振動板の腹の数 N を3個から1個へ変更したときの $d_p = 60 \mu\text{m}$ における炭酸水素ナトリウムの粒子挙動計算結果を図10に示す。なお本計算では、最大音圧を 2000 Pa とし、また水平方向の流れで下方に重力を受ける条件で計算を行った。 $N=3$ では図6の通り重力により落下しているが、図10の $N=1$ では落下が抑えられ、鉛直方向の節の位置に粒子を集め留めることができていることが分かる。前述の通り、たわみ振動振幅の大きい箇所で音

Fig. 10 Particle motion for ultrasonic vibration
(Sodium hydrogen carbonate, $d_p = 60 \mu\text{m}$, $P_{\text{max}} = 2 \text{ kPa}$, $N = 1$)

圧が大きくなり、この位置で粒子が放射圧を受ける。主流方向に粒子が移動する中で、 $N=1$ では長手方向に音圧の節がなく、長く大きな放射圧を受けることができるため、最大音圧を更に高めなくても粒子を板間の節の位置に移動させることができたと言える。つまり、音圧最大値以外にもたわみ振動モードを変えることで、効果的に粒子挙動を制御できると言える。一方、図6において計算結果では音圧の高い位置で粒子が徐々に節の位置へ動いている様子が見られる。つまり、主流方向に動くにつれて細かく粒子挙動を制御したい場合にはたわみ振動板の節

間隔を狭くし、音圧を高める必要があると言える。一方、細かい挙動制御が不要で小さい振動振幅で節の位置に集めたい場合は、節間隔を広くすると良いと言える。

参考文献

- [1] Kofu K., Ochi M., Takei M., Hirai Y., Influence of particle properties on friction reduction of particle mass by ultrasonic, J. Soc. Powder Technol., Japan, 46 (2009) 330-337
- [2] Haake, A., Neild A., Kim D.H., Ihm J. E., Sun Y., Dual J., Ju B.K., Manipulation of cells using an ultrasonic pressure field, Ultrasound in Med. & Biol., 31 (2005) 857-864
- [3] Morgan J., et al., Manipulation of in vitro toxicant sensors in an ultrasonic standing wave., Toxicology in Vitro, 18 (2004) 115-120
- [4] Miura, H., Radiation force in aerial intense standing wave field of two-dimensional distribution, J. Acoustical Soc. Japan, 47 (1991) 941-947
- [5] Nakamura K., Measurements of high power ultrasound in the air through the modulation in the refractive index of air, Technical Report of IEICE US, 101 (2001) 15-20

外部発表成果

口頭・ポスター発表

1. 鈴木 熙, 劉 昕舜, 河府 賢治: 超音波定在波による粒子挙動への影響, 2015 年度粉体

工学会春期研究発表会, S-13, pp. 82-83 (2015)

2. Xinshun LIU, Hikaru SUZUKI, Kenji KOFU: Control of particle motion by ultrasonic standing wave, 6th Asian Particle Technology Symposium (2015)