

超音波定在波による粒子挙動の制御

Control of particle behavior by ultrasonic standing wave

○大内 海輝¹ 劉 昕舜² 鈴木 熙² 河府 賢治³*Kaiki OUCHI¹, Xinshun LIU², Hikaru SUZUKI², Kenji KOFU³

The purpose of this research is to control the particles motion in the ultrasonic wave. The results of CFD have been compared with experiment in order to examine the possibility of particles motion control in the air. The result show that lager particle size, and smaller density of particle gathered at the node of the standing wave. Therefore, the particle is easy to gather if the maximum sound pressure is large, because acoustic radiation force increases. In addition, the particle is easily gathered by increasing the frequency.

1. 緒言

小塚らにより空気中において超音波を利用することで、微小粒子の挙動を制御できることが示されている¹⁾。超音波による粒子挙動の制御が可能になれば、非接触操作のため粒子構造を傷つけずに凝集や捕集等が行え、様々な技術への応用が期待できる。また、微粒子だけでなく DNA や細胞²⁾などにも応用できる。しかし、粒子を用いて様々な条件で実験を行うには多大な時間とコストが要求されるため、超音波による粒子挙動への影響を計算より求めて比較することで実験行程の削減および最適条件の提案が可能となる。

そこで本研究では、空気中での超音波定在波音場内を通過する粒子挙動の可視化実験と非定常粒子挙動計算を行う。同条件での結果を比較して計算の妥当性を確認し、さらに粒子条件を変更させた場合の粒子挙動の変化を調べ、粒子挙動の制御へ向けた最適条件の検討を行う。

2. 理論

2.1 数値解析手法

すべての解析領域について質量と運動量の保存式を解いており、流体についてはエネルギーの保存式を追加して解く。また、流れは乱流であるため追加でこれらの輸送方程式を解く。

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(1)に示す。

$$\int_{\Omega_{CV}} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} d\Omega = - \int_{A_{CV}} \rho \phi \vec{V} \cdot \vec{n} dA + \int_{A_{CV}} \Gamma (\text{grad} \phi) \cdot \vec{n} dA + \int_{\Omega_{CV}} S d\Omega \quad (1)$$

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。

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

2.2 音響放射力

流体中に放射された超音波を物でさえぎると、超音波によりその物を進行方向に押す力が生じる。これを音響放射力という。定在波音場中で、半径 a の球状粒子に働く音響放射力 F_{ac} は、 a が波長に比べて十分に小さい場合に次の式(3)で与えられる³⁾。

$$\begin{aligned} \overline{F_{ac}} &= V_p (D \nabla \overline{e_k} - (1 - \gamma) \nabla \overline{e_p}), D = 3(\rho_p - \rho_0) / 2(\rho_p + \rho_0) \\ \overline{e_p} &= \frac{\overline{p_a^2}}{2\rho_0 c_0^2} \quad \overline{e_k} = \frac{\rho_0 \overline{v_a^2}}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

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。

3. 計算条件

計算条件の概要を Table 1 に、解析領域の振動板間の拡大図を Fig.1 に示す。Vibration と記した境界を定在波振動させ計算する。振動板間の距離は、超音波定在波の節が 2 つとなるように 17.325mm と設定した。解析領域は左側から粒子の進行方向に気流を流入させ、解析領域の上部、下部、右側を流出境界とする。

4. 実験方法

可視化実験装置概略図を Fig.2 に示す。重力による粒子挙動への影響を避けるため、装置を垂直に設置し、図中の板を振動させ定在波音場を発生させる。矢印の方向に分散させた粒子を気流と共に投入し粒子挙動を観察する。振動板間にグリーンレーザを照射することで可視化し、粒子挙動を高速度カメラで撮影する。

Table 1 Analysis condition

Domain fluid	Compressible air
Fluid density	Ideal gas
Turbulent model	LES
Time dependence	Unsteady
Max velocity of flowing fluid U [m/s]	0.5
Vibration frequency f [kHz]	20
Time step size [s]	1/64 T (T: period)
Number of time steps	153600 (=0.12[s])

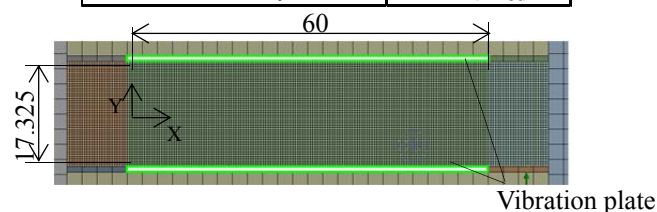


Fig. 1 Mesh model (units in mm)

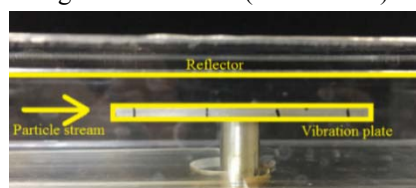
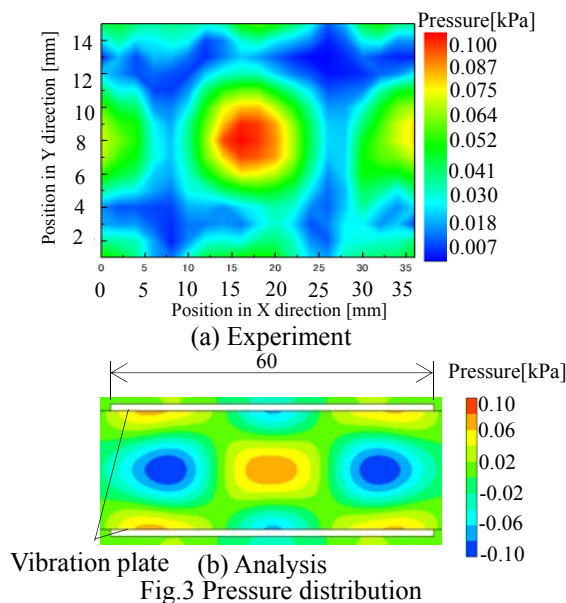


Fig. 2 Experimental apparatus



5. 計算結果および考察

5.1 音圧分布

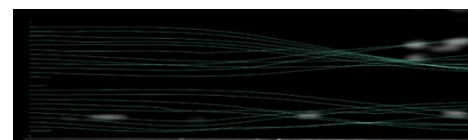
実験および解析で測定した振動板間の音圧分布を Fig.3 に示す. Fig.3 より, 設定通り板間に節が 2 つある音圧分布であり, 定在波が生じていると言える. また, 実験と計算で最大音圧, 音圧分布の形が一致していることから, 解析で実験と同じ定在波音場が形成できたと言える.

5.2 粒子挙動

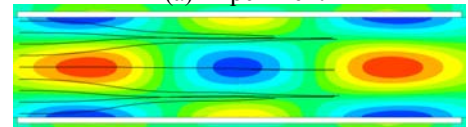
Fig.3 の定在波音場内を通過する粒子挙動に関し, 粒子条件を変更した結果を Fig.4~Fig.6 に(a)を実験結果, (b)を解析結果として示す. Fig.4 の 500 μm の発泡スチロールは実験と解析どちらにおいても粒子が超音波定在波の節に集中したため, 超音波定在波による粒子挙動の制御が可能であることが確認できた. また, 実験と解析で同様の傾向が見られ, 解析結果の妥当性が確認できた. しかし, Fig.5 の 60 μm 炭酸水素ナトリウムでは粒子挙動に変化が見られるものの, 定在波の節の位置に集中する様子は見られなかった. これは, 粒子径が小さく, 音響放射力が弱いためと考えられる. また, 粒子径を大きくした Fig.6 の 100 μm の炭酸水素ナトリウムでは Fig.4 に比べ粒子挙動の変化が小さい. これは粒子径を大きくすることで, 質量が増加し, 慣性力の影響が強くなったためと考えられる. Fig.5 と同一粒子とし, 最大音圧を 2kPa としたものを Fig.7, 周波数を 40kHz としたものを Fig.8 に示す. どちらも Fig.5 に比べ粒子挙動の変化が大きく定在波の節の位置に集中している. これは音圧, 周波数をそれぞれ高めることで音響放射力が大きくなるためと考えられる. 故に, 粒子挙動の制御には最大音圧や周波数を大きくすることが必要であると考えられる.

6. 結論

- 1) 超音波振動による圧力分布に関し, 粒子挙動において実験と解析で一致する結果が得られた.
- 2) 粒子挙動の制御には, 最大音圧や周波数を大きくすることが必要である.

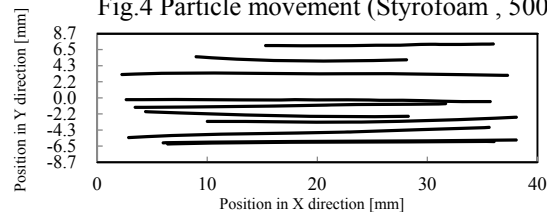


(a) Experiment

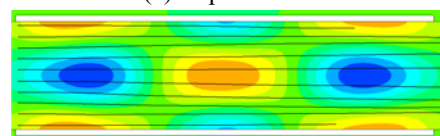


(b) Analysis

Fig.4 Particle movement (Styrofoam, 500 μm)

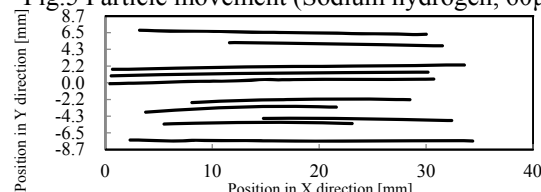


(a) Experiment

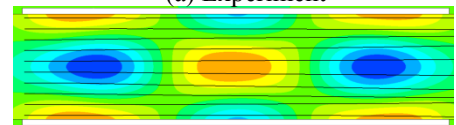


(b) Analysis

Fig.5 Particle movement (Sodium hydrogen, 60 μm)



(a) Experiment



(b) Analysis

Fig.6 Particle movement (Sodium hydrogen, 100 μm)

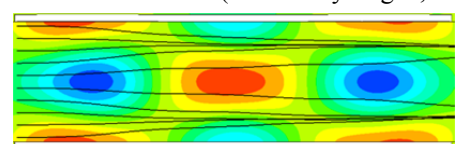


Fig.7 Particle movement (Maximum pressure 2kPa)

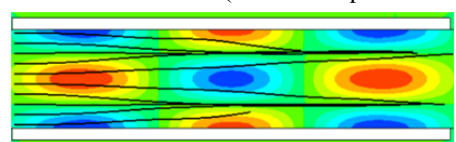


Fig.8 Particle movement (Frequency 40kHz)

- 3) 質量の大きい粒子は慣性力が支配的であり, 音響放射力による粒子挙動への影響を受けにくい.

7. 参考文献

- 1) 小塚晃透, 安井久一, 辻内亭, 砥綿篤哉, 飯田康夫: 定在波音場中で微小物体に作用する音響放射力の測定と計算, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J91-A, No.12, 1156-1160 (2008)
- 2) J.Morgan, et. al : Manipulation of in vitro toxicant sensors in an ultrasonic standing wave., Toxicology in Vitro, Vol.18, 115-120 (2004)
- 3) 超音波便覧編集委員会編: "超音波便覧", p196-198 丸善株式会社 (1999)