

浮遊液滴の安定性向上のための音場最適化

Acoustic field optimization to improve the stability of levitated droplets.

村田 愛美¹⁾

指導教員 長谷川 浩司²⁾

1) 工学院大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 混相流工学研究室

2) 工学院大学 工学部 機械工学科 混相流工学研究室

キーワード：音場浮遊, 安定性, 数値解析

1. 緒言

近年、音場浮遊法は非接触状態での液体・固体の移動制御、混合等を目的とし、生物・医学・化学分野においての活用が期待されている。音場浮遊法は、無容器プロセッシングが可能な非接触流体制御の一つであり^[1,2]、音響定在波における音響放射圧力により、試料の輸送や試料同士の混合等を可能とする浮遊法である^[3]。しかしながら、非線形効果に基づく音響放射圧力と試料自身の自重の釣り合いにより試料を浮遊させることに起因し、浮遊させた試料に並進運動、界面変形、微粒化挙動、内外運動や蒸発挙動などの非線形でダイナミクスな挙動が発生することが指摘されている。そのため、音場浮遊法を用いた非接触流体制御の確立に向けて、特に液体試料の浮遊安定性を向上させる必要がある。

本研究では、実験および数値解析手法 (COMSOL) を用いて、液滴が浮遊する任意の空間内の音場の最適化検討を目的とした。

2. 実験及び解析方法

まず関数発生器にて発信された正弦波信号を超音波振動子へ入力する。超音波振動子に接続された下部ホーンから超音波を発振し、リフレクタで反射することによりホーンとリフレクタ間に音響定在波を形成させる。その後、プローブマイクロフォンを使用して、テスト部内の音圧分布測定を測

定した。

さらに、実験結果と比較し、新たな実験装置の最適化検討のために COMSOL Multiphysics (ver. 5.4) により、数値解析でも音場を求めた。解析領域は周波数領域として、式(1)の波動方程式で示される圧力音響を想定した。

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla \rho_{t-qd}) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m \quad (1)$$

$$p_t = p + p_b \quad (2)$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{C_c} \right)^2 - k_z^2 \quad (3)$$

ここで、複素速度を $\rho_c [kg/m^3]$ 、音圧場大きさを $p_t [Pa]$ 、単位体積当たりの音響荷重を $q_d [N/m]$ 、方程式に関する波数を $k_{eq} [rad/m]$ とした。さらに、音圧場大きさを式(2)、方程式に関する波数の二乗を式(3)として、背景圧力場を $p_b [Pa]$ 、角振動数を $\omega [rad/s]$ 、複素音圧を $C_c [m/s]$ 、面外波数を $k_z [rad/m]$ とした。ホーンとリフレクタ形状の解析条件として、幾何学形状の概要図を Fig.1 に示す。

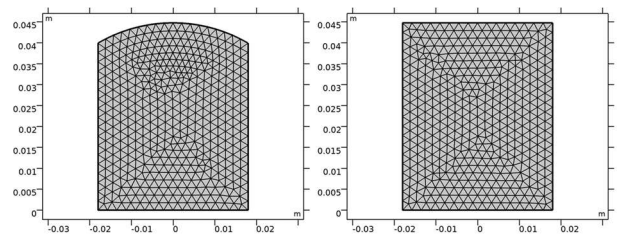


Fig. 1 Schematic of analysis setup.

3. 実験及び解析結果

Fig. 1 に示した曲面リフレクタと平面ホーンでの音場特性を把握するために、計測結果と解析結果を比較する。Fig. 2 に音圧発生領域の右半分（軸対称仮定）の圧力コンター図の比較結果（左：実験，右：解析）を示す。実験で用いたリフレクタ半径を 36 [mm] ($R36$) とし、解析のリフレクタ半径を $2 \times \lambda \approx 35.8$ [mm] ($R2\lambda$) とした。全体的に高さ方向に進むに従い、圧力が増加することが確認できた。これは、曲面リフレクタによる音波の収束性に起因する。

さらに、数値解析結果を基に音場の最適化の検討を行う。具体的には、リフレクタ半径 R を $R\infty$ (平面リフレクタ), $R2\lambda$, $R1.5\lambda$ とし、リフレクタ幅 W をホーン幅の 1.0, 1.5, 2.0 倍として変更することで各ケースを比較した。Fig. 3(a) に液滴の浮遊位置相における水平方向の音圧分布を示す。ここでリフレクタ幅を 1.0 倍に固定して半径を変化させた。その結果、 $R1.5\lambda$ が最も圧力差（圧力勾配）が大きいことが確認できる。これは、 $R1.5\lambda$ が液滴の浮遊に適する可能性を示唆する。一方、Fig. 3(b) に半径を $R1.5\lambda$ に固定してリフレクタ幅を変化させた場合の水平方向の音圧分布を示す。結果から、幅を 2 倍にした場合が最も並進運動が小さく復元力が大きいため、装置の改善案として妥当である可能性が確認できる。今後、数値解析に基づいて実験装置を試作し、その妥当性検証を進めていく。

4. 結言

本研究では、実験および数値解析手法 (COMSOL) を用いて任意の空間内の音場の最適化検討を行った。結果より、曲面リフレクタ ($R1.5\lambda$) を用いて、リフレクタ幅をホーン幅の 2 倍にした幾何学形状が液滴浮遊の安定性の観点から最適な音場とある可能性が示唆された。

参考文献

- [1] Yarin, A. L., et al., *Int. J. Multiphase flow*, Vol.28, (2002), 887-910.
- [2] Foresti, D., et al., *PNAS*, Vol.110 (31), (2013), 12549-12554.
- [3] Xie, J. W., et al., *Int. J. Phys. Rev. E* 66, (2002)

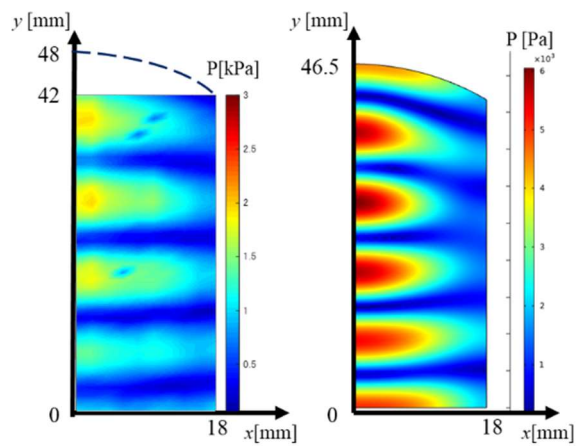
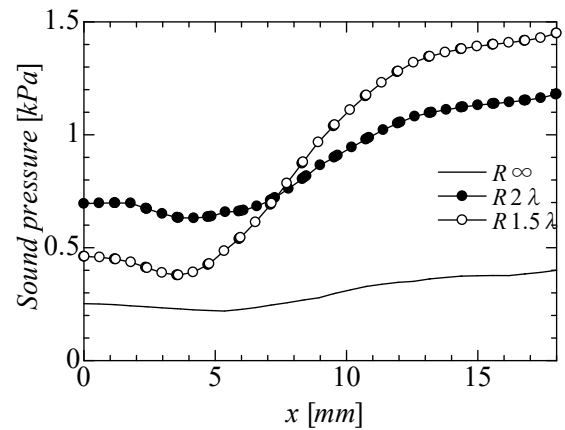
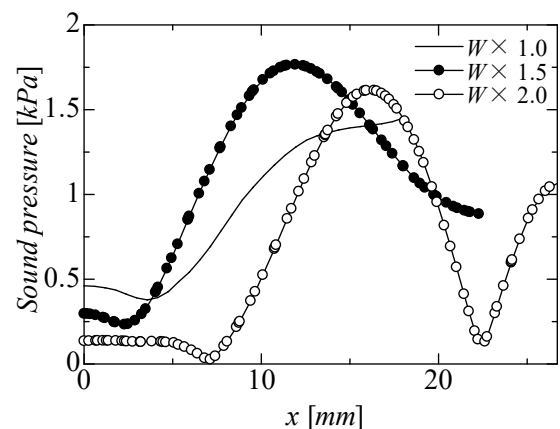


Fig. 2 Comparison of experiment and analysis.



(a) When the width is fixed and the radius is changed.



(b) When the radius is fixed and the width is changed.

Fig. 3 Sound pressure distribution at the node.