

平行振動板の同時加振により発生した空中超音波による 微小物体の非接触な捕捉と移動

Non-contact trapping and transport of small object using aerial ultrasound generated through simultaneous excitation of parallel vibrating plates.

東京工業大学 未来産業技術研究所 ○大澤 康一 中村 健太郎

FIRST, Tokyo Tech ○Koichi Osawa, Kentaro Nakamura

E-mail: kosawa@sonic.pi.titech.ac.jp

1. はじめに

精密製造業や製薬技術分野では、微小部品や薬剤を非接触操作する技術が必要になってきている。著者らは、空中の超音波定在波の音圧の節に向かって働く音響放射力[1-3]による微小物体の捕捉と非接触搬送を検討してきた[4-6]。空気浮上や磁気浮上方式ではエアコンプレッサや配管が必要、望まない磁場が発生してしまうといった欠点がある。一方、超音波浮揚方式ではこれらのほとんどの問題を解決することができる。

本発表では平行に配置した2枚の金属板に位相差を付加して同時にたわみ振動を励振することで、2枚の板の間に微小物体を捕捉したまま搬送する方法を提案し、その実験的検討を行ったので報告する。

2. 進行波音場合成の原理と実験系

2.1 たわみ振動板の平行配置による進行波音場合成

はじめに、2つのたわみ振動板を並行に配置することによる進行波音場合成の原理について Fig.1 を用いて説明する。上側振動板、下側振動板はともに周波数 f にて縞モードたわみ振動が生じるように設計されているが、ここではそのたわみ振動を正弦波の定在波と近似する。振動板の定在波振動の波長を λ とし、下側振動板を基準として上側振動板を $\lambda/4$ だけ図中の x 軸方向にずらし、 z 軸方向には間隔 D を取って配置する。さらに上側振動板の振動に対して下側振動板を $\mp\pi/2$ だけ時間をずらして振動させる。上側振動板のみを周波数 f で駆動した場合に振動板間に生じる音圧 P_U は以下の式(1)で表される。

$$P_U = P \sin k_x x \sin \omega t * \cos k_z z \quad (1)$$

また、下側振動板のみを周波数 f で駆動した場合に振動板間に生じる音圧 P_L は以下の式(2)で表される。

$$P_L = \pm P \cos k_x x \cos \omega t * \cos k_z z \quad (2)$$

なお、 k_x および k_z は以下の式(3)、(4)で与えられる x 軸方向および z 軸方向における波数を示す。

$$k_x = 2\pi/\lambda \quad (3)$$

$$k_z = 2\pi/(2D/n) = n\pi/D \quad (n: \text{モード次数}) \quad (4)$$

両振動板を同時加振した際に振動板間に生じる音圧分布 $P(x, z)$ は2つの定在波の合成波なので式(1)、(2)より

$$\begin{aligned} P(x, z) &= P_U + P_L \\ &= P \sin k_x x \sin \omega t * \cos k_z z \pm P \cos k_x x \cos \omega t * \cos k_z z \\ &= P \cos(k_x x - \omega t) * \cos k_z z \quad (\text{位相差: } -\pi/2) \\ &\quad - P \cos(k_x x + \omega t) * \cos k_z z \quad (\text{位相差: } +\pi/2) \end{aligned} \quad (5)$$

と表される。式(5)より、振動板間に合成された音場は z 軸方向では浮揚に用いる定在波、 x 軸方向では搬送に用いる正または負方向への進行波となっている。

2.2 実験系

次に実験系を Fig.2 に示す。2 相出力ファンクションジェネレータを用いて上側振動子(振動子 1)に対して下側振動子(振動子 2)の位相をずらした交流電圧を印加した。振動板は長さ $L = 99 \text{ mm}$ 、幅 30 mm 、厚さ $t = 2 \text{ mm}$ のアルミニウム板を使用した。たわみ振動を板に沿って発生させるために端から 10.1 mm の振動の腹にねじ締めによって振動子に取り付けておられ、固有周波数 26.5 kHz で 8 次の縞モードが生じる。また振動板の間隔 D は z 軸方向に節が 1 つの定在波が生じるように $7 \sim 8 \text{ mm}$ とした。なお x 軸方向は空間的に位相がずれた振動を励振するために 6 mm 離して配置した。Fig.3 より両振動子は周波数 26.76 kHz 付近に共振を有し、力係数はそれぞれ $A_1 = 0.291 \text{ N/V}$ 、 $A_2 =$

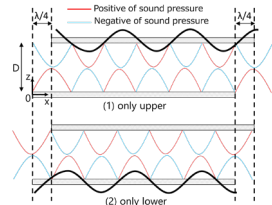


Fig.1 Sound pressure distribution when only one side vibrating plate is vibrated.

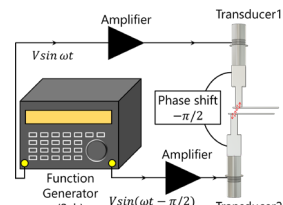


Fig.2 Experimental setup (Phase shift: $-\pi/2$).

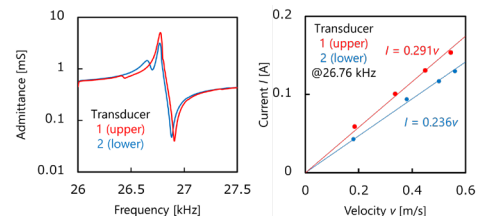


Fig.3 Admittance characteristics and force factors of transducers at 26.76 kHz .

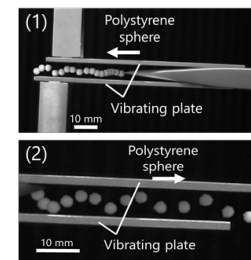


Fig.4 Photograph of the transport trajectory of a polystyrene sphere taken by every 10 ms : (1) left and (2) right direction.

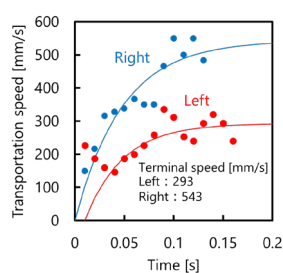


Fig.5 Change in the transport speed of particle with respect to time. The transport speed is expressed as $v_0(1 - \exp(-t/\tau))$.

0.236 N/V である。力係数とアドミタンスに差があるため、両方の振動板を同じ振動振幅で励振するために印加電圧を調整した。

3. 微小物体の浮揚と移動

今回の実験では微小物体として直径 2 mm のポリスチレン小球を用いた。駆動周波数 26.76 kHz で2つの振動子を駆動し、駆動電圧および位相を調整したところ小球の非接触搬送に成功した (Fig.4)。また差分法を用いて小球の速度を算出したところ[5]、時間に応じた速度変化の様子は Fig.5 のようになった。

今後は、より大きさの小さい物体の搬送に向けて周波数の高い振動子を用いた実験を行い検証する。

参考文献

- [1] L. V. King, *Proc. R. Soc. Lond. A* **147**, 212 (1934).
- [2] W. L. Nyborg, *J. Acoust. Soc. Am.* **42**, 947 (1967).
- [3] L. P. Gor'kov, *Sov. Phys. Doklady*, **6**, 773 (1962).
- [4] D. Koyama, et al., *UFCF* **16**, 1152 (2010).
- [5] Y. Ito, et al., *AST* **31**, 420 (2010).
- [6] M. Ding, et al., *APEX* **5**, 097301 (2012).