Japan Society of Fluid Mechanics

日本流体力学会年会 2003 講演論文集

D-223

共鳴管内における球の音響浮揚現象

Acoustic Levitation of a Sphere in a Resonator Tube

○栗原央流 (北大工), 井上良紀 (北大工), 矢野猛 (北大工), 別当屋敷豪人 (北大工)

Eru KURIHARA, Yoshinori INOUE, Takeru YANO, and Akihito BETTOUYASHIKI

Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo, Japan

The acoustic radiation pressure exerted on a sphere by a sound field generated in a resonator tube is experimentally studied. The standing wave of large amplitude can be produced when the source is driven at the eigenfrequency of the gas column in the tube. Thereby the sphere is levitated, whose radius is sufficiently small compared with the wavelength. The acoustic radiation pressure can be estimated by measuring the mass and the location of the levitated sphere in equilibrium. Moreover, investigated is the dependence of the acoustic radiation pressure, and the location of the sphere on the pressure amplitude of the resonant wave.

1. 緒論

大振幅の音場中に置かれた物体には、その表面に音響放射圧という圧力が作用することが知られている[1]. 近年, この音響放射圧を利用して, 物体の位置を制御したり, その加工を行う技術が注目されている. 音波を利用して物体を非接触で空中に浮揚させる音響浮揚の研究もそのひとつである[2]. 音響浮揚のメカニズムには定在音場型[2),3)]と近接音場型[4)]がある. 本研究で扱われる問題は定在音場型に属する.

音響浮揚による物体の制御技術を実用化するには, 物体を安定して浮揚させること, および, 浮揚位置を正確に制御することが不可欠である. そのためには, 物体の浮揚位置が音圧の分布や物体の大きさ, 形状に対してどのように依存するのかを知る必要がある.

本研究は, 大振幅の共鳴音場中に置かれた球の音響浮揚現象を気柱共鳴管を用いて実験的に明らかにすることを目的としている. 共鳴管内の音圧レベルや音圧分布に対する管内に置かれた球の浮揚位置の依存性を調べ, その結果と King[1)] の理論によって示される浮揚位置との比較を行う. 同時に, 球の有無およびその位置によって管内の音圧分布がどのように変化するのかを調べる.

2. 実験装置および実験方法

Fig. 1 に本研究で用いられた実験装置の概略を示す. アクリル製の共鳴管の底部にリニアモーターによって駆動される振動板が取り付けられている. リニアモーターは永久磁石が作る強力な磁界の中をコイルが軸方向に往復運動するタイプのモーターで, アンプから入力された信号により周期的な振動を行い, 接続された振動板から音波を放射する. この振動板を管内の気体の共鳴振動数で駆動することにより管内の気体中に大振幅の共鳴波を発生させる. 振動板の振幅はモーターに入力される電流の値に比例することが LDV による振動板の速度の計測により確かめられている. 管の断面は 100mm×100mm の正方形断面, 管長は 1,000mm である. 管と振動版および閉端部の接続面には高真空グリースを塗布することにより気密性を高めている. 共鳴管の閉端部と側面にはマイクロフォンを挿入するための穴が合計 22 箇所開けられており, この位置で音圧の測定を行うことができる. 音圧の測定を行っていない部分は先端を平滑にしたボルトでふさいでおり, 音漏れを防止している. 球はフォームポリスチレン製で, 共鳴管の中心軸を貫くように張られた糸によってその移動方向を 1 次元 (管の軸に沿った方向) に制限している. 本研究では主に直径 10mm, 質量 0.022g と直径 15mm, 質量 0.063g の 2 種類の球を使用している.

実験は, まず, 球を浮揚させるのに適切な共鳴振動数を選定するとともに, 球が存在しない場合における管内の音圧分布の測定を行った. ついで, 音源の振幅の大きさによる球の浮揚位置の変化を調べた. 最後に, 球の質量を少しずつ増加させてゆき, 各質量における球の浮揚位置から球に作用する音響放射圧の大きさやその分布の様子を調べ, King[1)] によって導かれた理論値と比較を行った.

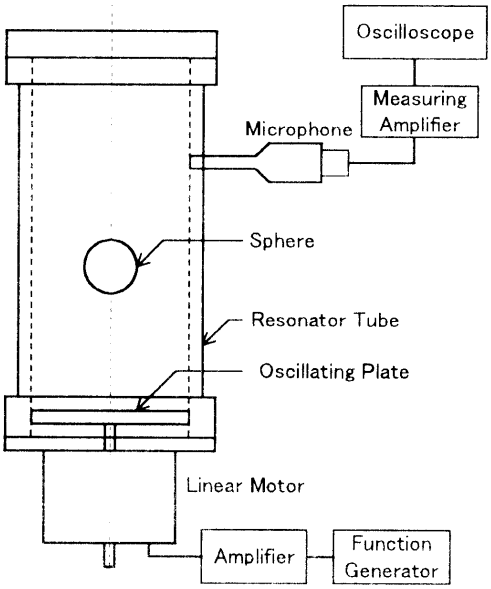

Fig.1 Schematic of experimental setup.

3. 実験結果

King[1)] による, 定在波中の球に働く音響放射圧による力 (音響放射力) F は,

$$F = \pi \frac{|A_p|^2 k R^3}{\rho_0 c_0^2} h\left(\frac{\rho_0}{\rho_1}\right) \sin 2kx + O(\alpha^4) \qquad (1)$$

$$h\left(\frac{\rho_0}{\rho_1}\right) = \frac{1 + \frac{2}{3}(1 - \rho_0/\rho_1)}{2 + \rho_0/\rho_1} \qquad (2)$$

と表される. ここで, $|A_p|$ は音波の圧力振幅, k は波数, R は球の半径, c_0 は音速, ρ_0 は初期の気体の密度, ρ_1 は球の平均密度, x は振動板の平均位置から球の中心までの距離である. ここで, α は波長に対する球の大きさを評価す

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Fluid Mechanics

るために導入されたパラメータで，$\alpha = kR$ と定義される．$\rho_0/\rho_1 \ll 1$ の場合，式 (1) は，

$$F = \frac{5}{6}\pi \frac{|A_p|^2 kR^3}{\rho_0 c_0^2} \sin 2kx + O(\alpha^4) \qquad (3)$$

と書ける．本研究において，ρ_0/ρ_1 の値は 0.023～0.03 であるので，理論値として式 (3) から求まる値を採用する．また，参考として，球による音波の散乱の影響を無視した際の音響放射力は以下の式によって与えられる．

$$F = \frac{2}{3}\pi \frac{|A_p|^2 kR^3}{\rho_0 c_0^2} \sin 2kx \qquad (4)$$

Fig.2 に球の直径 d = 15mm，音源の振動数 f = 168Hz(基本振動数) における球の浮揚位置の音圧振幅に対する依存性を示す．図中の太い実線は式 (3) による理論値，細い実線は式 (4) によって計算された値である．音圧の振幅が大きいほど，球は高い位置で浮揚することがわかる．また，実験によって得られた結果は，式 (4) による値とよく一致している．

Fig.3 は球の質量を徐々に変えながら，各質量毎に浮揚位置を測定することによって得られた，音響放射力 F の分布を示した図である．ただし，図中にプロットされた音響放射力の大きさは，浮揚している球が静止状態にあるときに，球に働く重力と等しいとして求められている．また，音源の音響 Mach 数 $M = 1.9 \times 10^{-3}$，d = 15mm，f = 168Hz である．Fig.2 と同様に，太い実線と細い実線はそれぞれ式 (3) と (4) によって求められた理論値である．音響放射力は，式 (3)，あるいは式 (4) で示されるように，$\sin 2kx$ の分布に従うことが確かめられた．ここでも，実験値は式 (4) による値と極めてよく一致している．

最後に，球が浮揚している際の共鳴管内の音圧分布を Fig.4 に示す．■ で示された点は球が存在しないときの音圧分布，● で示された点は球が浮揚している場合の音圧分布である．浮揚している球の位置は図中の ▲ によって示されている．音源側から見て球の背後に当たる領域では，音圧値の減少が顕著に現れている．共鳴管内に球が存在することによって音場が乱され音圧値が減少するが，球の背後ではその影響が特に強いことを示している．

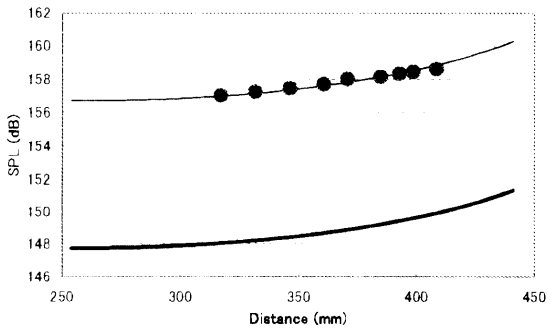

Fig.2 Relationship between the pressure amplitude and the position of the center of the sphere.

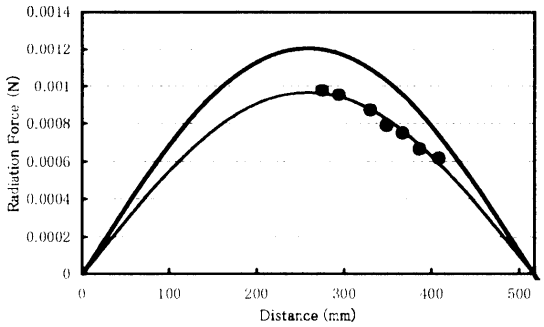

Fig.3 Sound pressure distribution in the resonator tube.

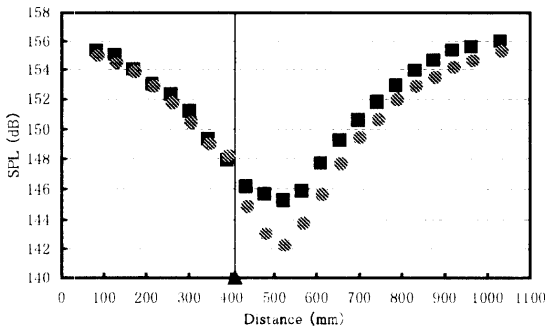

Fig.4 Variation of the position of the sphere due to the varying mass of the sphere.

4. 結論

本研究では，共鳴管内の音圧の測定と球の浮揚位置の測定を行うことにより，音響放射圧と管内の音圧分布との関係を調べた．共鳴管内に球が存在すると管内の音場が乱れ，音圧が減少することが示された．この影響はとくに球の背後の領域で顕著に現れる．実験で得られた球に作用する音響放射力は King が導いた式による値よりも小さく，本稿で示した音波の散乱を考慮しない場合の式による値と極めてよく合致した．しかし，球の存在によって共鳴波の音圧が低下していることから，球による散乱の影響が無視できる程小さいとは考えにくい．King の理論では剛体球を考えており，かつ，空間 1 次元の問題を取り扱っているが，本実験ではフォームポリスチレン製の球を用いており，球によって散乱された音波が管壁によってさらに反射され複雑な音場を形成していると考えられる．また，音波の非線形性によって管内には高調波が励起されており，そのために King による理論値との相違が現れた可能性もある．音響放射圧に対する球の材質や管壁の影響および高調波が与える影響を見積ることが今後の課題である．

引用文献

1) L. V. King: Proc. R. Soc. Lond. A**147** (1934) 212.
2) A. L. Yarin, M. Pfaffenlehner, and C. Tropea: J. Fluid Mech. **356** (1998) 65.
3) E. Leung, N. Jacobi, and T. Wang: J. Acoust. Soc. Am. **70**(6) (1981) 1762.
4) H. Nomura, T. Kamakura, and K. Matsuda: J. Acoust. Soc. Am. **111**(4) (2002) 1578.

NII-Electronic Library Service