

キャビティ列流路における空気流に及ぼす超音波の影響

Effect of ultrasonic waves on airflows in a cavity-array channel

システム工学群

流体工学研究室 西良 亮祐

1 緒言

近年、超音波によって生成される音圧場を利用した固体あるいは液体の非接触浮上・搬送システムの実用化に関する研究⁽¹⁾⁽²⁾が行われている。この原理は、超音波スピーカから発せられた音による定在波が波状の音圧場を生成し、音圧の低くなる節の位置で物体を捕獲することによる。超音波が気体の圧力場に影響を及ぼすのであれば、音圧が流動にも影響を及ぼす可能性がある。

超音波による定在波は、音源と反射面の間、もしくは対向する音源の間で生成される。矩形管内流れの場合、管側壁間で定在波を生成することが可能であるが、音圧の変動方向と主流の方向が直交しており、音圧の影響は小さいと考えられる。そこで、キャビティ部を有する管内流れであれば、キャビティ内部で主流方向と同一方向定在波を発生させることができ、定在波によってキャビティ内の渦流れに影響を与えることで、間接的に主流に影響を与えることが期待できる。

本研究では、図1に示すような5個のキャビティを有するキャビティ列流路を考える。各キャビティ内には超音波発生源が設置されており、キャビティ内で超音波による定在波を作り出すことができる。超音波照射時のキャビティ内の音圧分布の測定と超音波の有無による流路上流部と下流部の圧力差の測定を行うことで、超音波が流動に及ぼす影響を調べる。

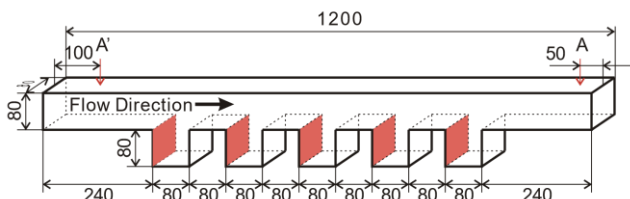


Fig. 1 Flow geometry

2 予備計算

実験に先立ち、キャビティ列流路内における空気流の挙動についてシミュレーションを行った。本計算では、実験条件設定の参考とするため、流路内のレイノルズ数 $Re=700$ (代表長さ: 流路幅 0.08[m]) における流速分布の計算を行った。計算対象とした流れ場は、図1に示す5個のキャビティを有するキャビティ列流路である。解析領域は三次元とし、流路入り口では 0.1368 [m/s] の一様流速条件を与え、流路出口には自由流出条件を与えた。流路壁面およびキャビティ壁面には no-slip 条件を適用した。計算ソルバは OpenFOAM の非圧縮性、層流の速度-圧力ソルバの icoFoam を用いた。予備計算により得られた流速分布の計算結果を図2に示す。計算結果に基づき、各キャビティ内の渦構造の中心位置を定量的に評価した。

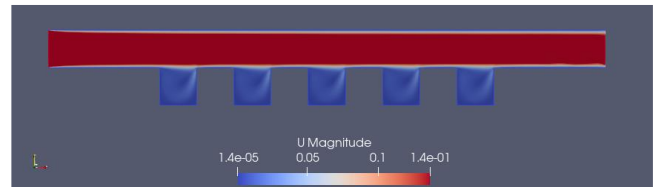


Fig. 2 Numerical analysis of cavity array flow under the Reynolds number of 700

3 実験装置及び実験方法

3.1 キャビティ内の音圧分布の測定

流動実験に先立って、超音波によって生成されるキャビティ内の音圧分布を調べる。

超音波発生源として、中心周波数 40kHz (SPL LIMITED 製: UT1007-Z325R) および 30kHz (same sky 製: CUSA-T80-130-3000-TH) のパラメトリックスピーカの2種類を用いる。ただし、これらの製品はサイズが異なるため、キャビティ内の上流側壁面に図3(a)40kHz および(b)30kHz のように配置した。流路に用いた材質はアクリルである。また、パラメトリックスピーカの駆動方法として、ファンクションジェネレータ (IWATSU 製: SG-4321) から 40kHz または 30kHz の信号を 4.5V 出力し、さらに高速バイポーラ電源 (エヌエフ回路製: HAS 4011) を用いて電圧を 45V まで増幅させた信号をパラメトリックスピーカ群に入力した。

キャビティ内部に発生する定在音圧場の測定を図4に示すようなキャビティ1個を模した装置を用いて行った。圧力測定用の細管 (外径 0.81 mm, 内径 0.15 mm, 材質 SUS304) を X 軸ステージを用いてトラバースすることで、圧力場の x 方向分布を約 0.2 mm 間隔で測定した。圧力測定には微差圧センサ (SENSIRION 製: SDP810-125Pa) を用いた。

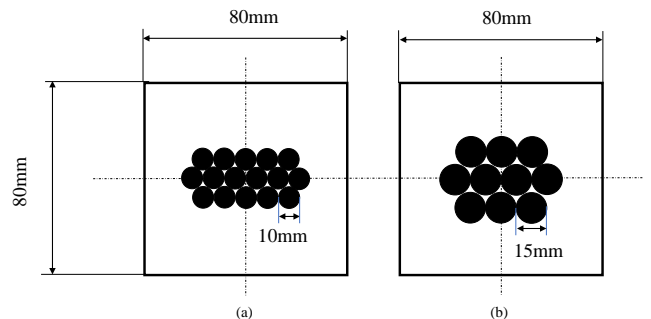


Fig. 3 Parametric speaker array

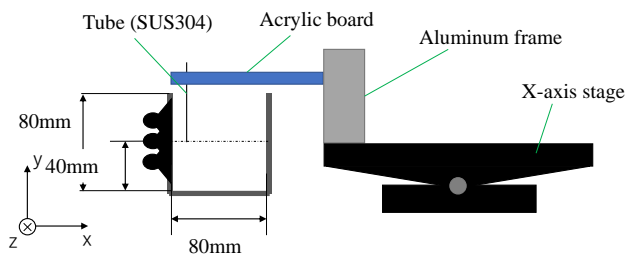


Fig. 4 Schematic of an experimental set up for pressure measurement with in a cavity

3.2 流動実験

超音波の有無による流路上流部と下流部の圧力差の変化を評価するために、図1のAおよびA'の位置に圧力測定孔を設け、A-A'間の差圧を測定する。また、流路出口中央部でピトー管を用いて流速の測定を行う。流路入り口部分にはハニカム構造の清流板が設置されている。方吸込形シロッコファン BE-10S(三菱電機)を用いて流路に空気流を発生させる。シロッコファンの空気取り入れ口に設置する開口板と交流電圧調整器 V-112(エスエムテ)を用いて流速を調整する。流路上流部と下流部の差圧が小さく ($Re=700$ の場合に、約 0.02Pa)、超音波の照射による主流の圧力差への影響を直接計測することが困難であるため、パラメトリックスピーカ群へ電圧を 0.5 秒毎に ON-OFF の繰り返し入力した結果を FFT 解析することで、超音波印加による影響を間接的に調べる。

4 実験結果

4.1 キャビティ内の音圧分布の測定結果

図5(a), (b)は、周波数 40kHz および 30kHz のパラメトリックスピーカを用いた場合の、キャビティ内の圧力分布を表す。いずれの図においても、圧力のピーク値にばらつきが見られるものの、 40kHz の場合には 4.2mm 、 30kHz の場合には 5.7mm の一定周期の圧力分布が確認できる。この周期は、音速 (340m/s) から算出した超音波の周期 (40kHz で 8.5mm 、 30kHz で 11.3mm) の半分に相当し、キャビティ内部で照射音波と反射音波による定在波が形成されていることが分かる。また、圧力ピーク値のばらつきは、キャビティの寸法が超音波周期の整数倍になっていないこと、およびキャビティ中央面の上下に設置されたスピーカからの音波干渉があることに起因する。

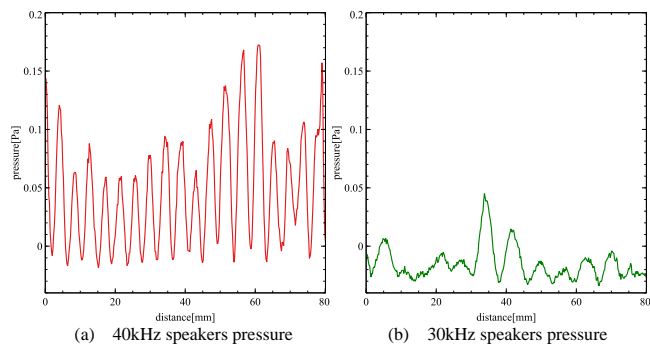


Fig. 5 Pressure distribution with in a cavity

4.2 流動実験の結果

結果の一例として、図6(a), (b)に $Re=700$ および 16000 の場合の、流路上流および下流の差圧の FFT 変換結果を示す。いずれの図においても、 40kHz の超音波を印加した場合 (赤線) および印加しない場合 (青線) を併記している。 $Re=700$

の場合、超音波を印加しない場合には、全周波数領域で小さな値しか示さないが、超音波印加時には約 1Hz で鋭いピークを示しており、 0.5 秒毎の超音波の ON-OFF の影響により、主流の差圧に影響が現れることが確認できる。一方、 $Re=16000$ の場合には、主流の圧力差が大きいこと、および乱流による圧力変動が大きいことから⁽³⁾、 1Hz 近傍で超音波の印加による違いは見られない。

図7(a)および(b)は、 30kHz のパラメトリックスピーカを用いた場合の、 $Re=700$ および 16000 における差圧の FFT 解析結果である。図5の場合と同様に、 $Re=700$ の場合には、超音波照射時に 1Hz 近傍に明確なピークが出現する一方で、 $Re=16000$ の場合には超音波照射の有無による差圧への影響は明確には見られない。また、 $Re=700$ における 1Hz 近傍のピーク値は、 40kHz のパラメトリックスピーカを用いた場合と比較して半分以下である。図4に示したキャビティ内の音圧分布の振幅の違いに起因していると考えられる。

以上の結果より、キャビティ列流路のキャビティ部で超音波による定在波を発生させた場合、 Re 数が比較的小さい場合には主流の圧力差に影響を及ぼすことが確認できた。

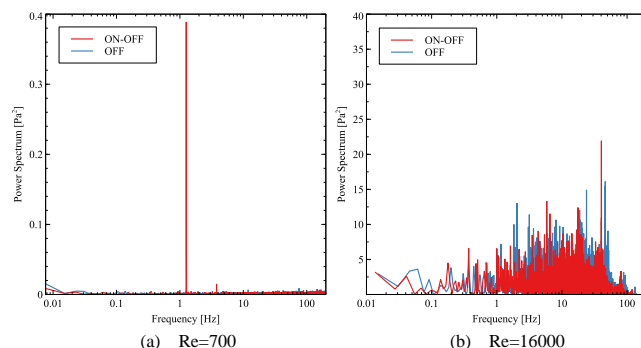


Fig. 6 FFT analysis of differential pressure for 40kHz ultrasonic

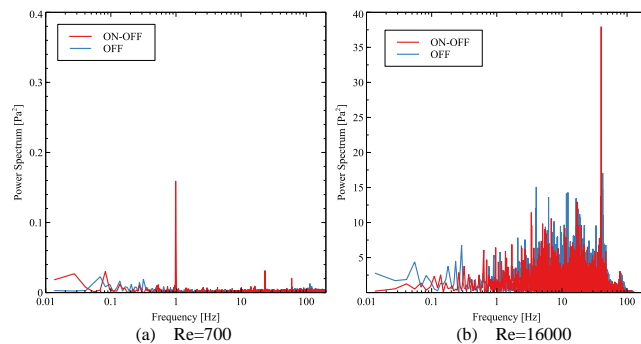


Fig. 7 FFT analysis of differential pressure for 30kHz ultrasonic

5 引用文献

- (1) 中村健太郎, “超音波による空中での物体非接触搬送”, 電気評論 2016. 9
- (2) 吉本成香, 山崎友美, 戸田和之, 宮武正明, “超音波振動を利用した非接触チャックに関する研究 (浮上物体に加わる保持力の発生要因について)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 73, No. 728 (2007), pp.1208-1214.
- (3) Rowley, C. W., Colonius, T. and Basu, A. J., On Self Sustained Oscillations in Two-Dimensional Compressible Flow over Rectangular Cavities, Journal of Fluid Mechanics, Vol.475(2002), pp.315-346.