

正 平原裕行 (埼玉大) 正 川橋正昭 (埼玉大),
K.HOURIGAN(モナシュ大.)

Hiroyuki HIRAHARA, Saitama University, Shimo-Okubo 255, Sakura, Saitama, Japan
Masaaki KAWAHASHI, Saitama University
Kerry HOURIGAN, Monash University, 3800, Clayton, Australia

The acoustic and fluid dynamic resonance in a two-dimensional cavity flow was investigated experimentally. In order to visualize a periodic oscillation of the shear layer and the behavior of vortices, a schlieren method was engaged with an ordinary CCD camera and high-speed video cameras. Particle image velocimetry (PIV) measurement was also carried out to obtain the vorticity distribution during the oscillation of the cavity flow. Shedding and interaction of vortices in the shear layer were observed near the trailing edge of the cavity, which causes the generation of pressure waves. The feedback process of the oscillation was determined using high-speed camera images. From these results, the oscillation cycle was indicated in an $x-t$ diagram. From the $x-t$ diagram, Rissiter's integers in his formula were determined. The result obtained PIV measurement show the outgoing and incoming flow near the trailing edge of the cavity. It was confirmed that the fluid dynamic instability due to the shear layer caused a large mass flow near the trailing edge.

Keywords: Cavity Flow, Acoustic Resonance, Transonic Flow, PIV Measurement

1. 序論

キャビティ流れにおける音の発生の問題は、流体力学的不安定性問題の一つとしてよく知られている。この問題は、Helmholtz によって解析がなされて以来、多くの研究者によって研究が進められてきた。Owen は、低速風洞を用いて航空機機体の収納キャビティにおける圧力変動の発生について研究を行った。同様な研究はその後、Norton によってもなされている。Krishnamurty¹⁾は、周期的に発生する圧力変動について研究を行い、この現象が亜音速、超音速の幅広い領域において発生することを示した。また Plumblee²⁾は、キャビティ流れにおける共振現象はキャビティ前縁から流入する乱流境界層の乱れに大きく影響を受けることを指摘している。しかしながら上流の境界層が層流の場合でも共振現象は同様に発生することを Krishnamurty が指摘している。Rossiter³⁾は、このキャビティ流れの共振現象の最も基本的なモデルを示した。Heller⁴⁾は、Rossiter のモデルをキャビティ内の音速の変化を考慮して修正を行い解析を行った。その後も Rockwell, Rockwell and Naudascher, Tam⁵⁾, Tam and Block, Zhang and Edwards⁶⁾, Tracy et al. など、多くの研究者によって研究が行われてきた。これまでの研究によって、キャビティ流れにおける音の共振現象は、音響学的な共振と流体力学的な共振の二つに大別して考えるべきであることが明らかとなった。いずれの場合にも、キャビティ前縁から発生するせん断層において発生する渦がキャビティ後縁において大きな擾乱を発生し、その擾乱のフィードバックによってキャビティ内に自励振動が形成されることは共通したメカニズムである。流速が大きくなると次第に流体力学的不安定性が増大し、共振による圧力変動の振幅は増大する。特に、流れのマッハ数が遷音速であるときには、この圧力変動は大きく、マッハ数が 1.2 から 1.5 において極値を持つことが知られている。このことは、キャビティ内における共振のメカニズムに加えて、遷音速特有の流れの不安定

性が関係しているものと考えられる。本研究は、流れのマッハ数 0.5 から 0.85 程度のキャビティ流れにおいて発生する自励振動の不安定性を解明するために、高速度カメラを利用した可視化と PIV 計測による速度計測を行って、流れの速度場と瞬時流線の変化について調べることを目的とする。

2. 実験装置

図 1 に実験装置の概要を示す。実験装置本体は、間欠式風洞で、真空チャンバを所定の圧力まで減圧し、真空チャンバと測定部を仕切っている隔膜を破膜することにより流れを発生させる。測定部管路は、高さ $H=20\text{mm}$ 、幅 $W=25\text{mm}$ の矩形断面である。キャビティの形状は、深さ $D=20\text{mm}$ 、長さ $L=20,40\text{mm}$ とした。流れの持続時間は最大 2 秒で、予備実験により、測定部の圧力が一定とみなすことができる定常流れの持続時間は、およそ 1.5 秒であることを確認した。今回の実験は、亜音速流れを対象としているために、測定部下流にスロート部を設けて流れのマッハ数をお調整した。実験においては、圧力測定、可視化観察、および粒子画像計測法(PIV)による速度計測を行った。圧力センサーは、可視化計測を行う場合には、キャビティ

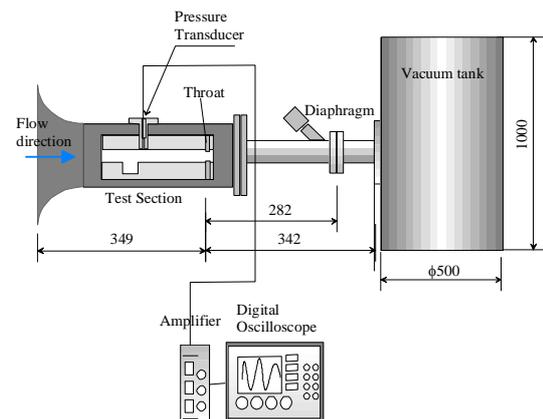


Fig.1 Experimental apparatus

上部に取り付け、PIV 計測を行う場合には、レーザー光を測定部上部から照射する関係から、測定部側壁のキャビティ上方に位置する場所に設置した圧力センサーは、Kulite XCQ-062-50A である。圧力信号は、100kHz のサンプリング周波数で 10bit の解像度のストレージオシロスコープにより記録した。高速度カメラは、近畿大学江藤教授によって開発された ISIS である。フレーミングレートは $30 \sim 10^6$ fps であり、解像度は 312×260 pixels である。光源にはハロゲンランプを使用した。PIV 計測は、IDT-SharpVision (解像度 $1360H \times 1036V$, 分解能 10 bits, 最小フレームストロリング間隔 200 ns) を使用し、IDT-ProVisison を使用して相互相関を用いて速度の解析を行った。PIV に使用した Twin-YAG レーザーの発光強度は 30mJ/pulse である。PIV 計測に用いたトレーサーは、ドライアイス温水に浸すことによって生成したミストを用いている。ミストは、測定部上流に一端蓄えられ、測定開始と同時に測定部にこれを吸い込む閥式の方法を取った。

3. 実験結果と考察

図 2 に圧力計測によって得られた圧力波形を FFT 解析によりスペクトル解析し、各離散周波数の音圧を求めて整理した結果を示す。音圧を求める際の基準圧力は、通常定められている 2×10^{-5} Pa を用いた。図に示されている m は、Rossiter および Heller の式において用いられている共振モードに対応する整数である。

$$St = \frac{fL}{U_c} = \frac{m - \alpha}{M / \sqrt{1 + 1/2(k-1)M^2 + 1/K_c}}, m = 1, 2, 3, \dots$$

実験は、 $L/D = 1.2$ に対して行っているが、ここでは、 $L/D = 1$ の実験における結果のみを示す。図からわかるように、マッハ数の全領域にわたって、 $m = 2$ が最も高い音圧を示していることがわかる。ただし、マッハ数が 0.6 より低い場合には、 $m = 1$ または 3 の奇数次モードが最も音圧が高くなることわかる。

図 3 は、高速度カメラによる観察結果の一部である。この可視化画像の各フレームから、キャビティ前縁から下流側に放出される渦と、主流を上流側に伝播する圧力波の位置を求めてグラフにしたものが、図 4 である。図の x の値は、キャビティ前縁と後縁を結ぶ直線上の位置である。この図から、渦の移動速度と圧力波の伝播速度を求めることができる。これにより求めた渦中心と圧力波の移動速度はそれぞれ、実験室座標系に対して 125m/s および 130m/s であった。等エントロピー膨張を仮定して、主流の静圧から求めた主流の速度と音速は 248m/s および 323m/s である。これから、式(1)の Kc は、0.5 となり、また、圧力波の伝播マッハ数は 1.17 となる。 Kc の値は、これまでの実験値の値よりもやや小さな値となった。一方、圧力波の伝播マッハ数は超音速であることが明らかとなった。本実験は、管内におけるキャビティ流れを対象であるために、主流が音速に近いことの影響は、外部流れの場合よりも大きいことが考えられる。そのために上流へ伝播する圧力波は超音速となっていると考えられる。

図 5 は PIV によって得られた速度計測結果の一例である。左は、PIV 画像であり、右はそれによって得られた速度ベクトル線図である。また、図 6 は、この速度ベクトル線図から瞬時流線を求めた結果である。今回の計測では、流速 250m/s 程度から 20m/s 程度までの広い範囲で速度が良好に回復され、キャビティ内の流れを妥当な精度で計測されていることが判明した。得られた速度ベクトルおよび瞬時流線は、主流の変動、およびキャビティ内の循環流を適切に計測できている。結果は妥当であり、PIV 計測の結果を

詳細に解析することで、流体力学的な不安定性によって発生している、キャビティ前縁からのせん断層の流線の大きな変動およびキャビティからの流体の周期的な放出の様子を確認することができる。

謝辞 本研究の遂行にあたって近畿大学の江藤教授に多大なるご協力をいただきましたことに感謝の意を表します。

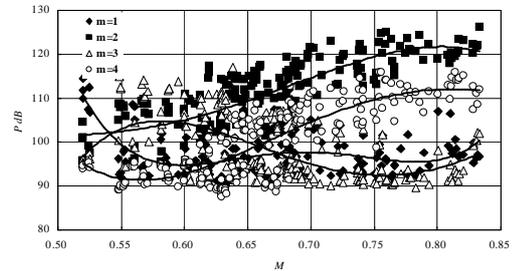


Fig.2 Acoustic intensity

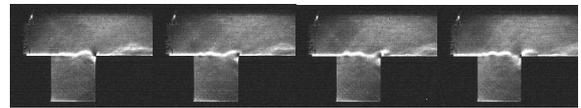


Fig.3 High speed flow visualization

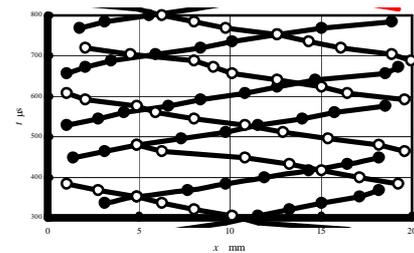


Fig.4 $x-t$ diagram

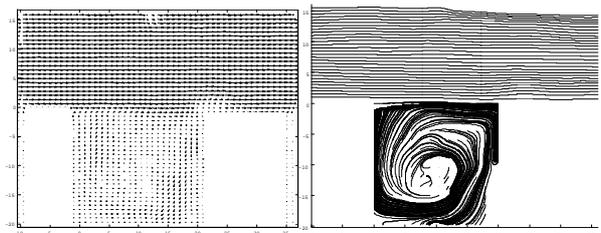


Fig.5 Velocity vector

Fig.6 Stream lines

参考文献

- 1) Krishnamurty, K., "Acoustic Radiation from Two-dimensional Rectangular Cutouts in Aerodynamic Surfaces", *NACA Technical Note*, 1955, pp.3487-.
- 2) Plumblee, H.E., Gibson, J.S. Lassiter, L.W., "A Theoretical and Experimental Investigation of the Acoustic Response of Cavities in an Aerodynamic Flow", *WRDD-TR-61-75*, 1962.
- 3) Rossiter, J.E., "Wind-Tunnel Experiment on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds", *Royal Aircraft Establishment ARC R&M*, No.3438, 1964.
- 4) Heller, H.H., Holmes, D.G. and Covert, E.E.: Flow-Induced Pressure Oscillations in Shallow Cavities, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.18(4), pp.545-553, 1971
- 5) Tam, C.K.W., The acoustic mode of a two-dimensional rectangular cavity. *J. Sound Vib.* Vol.49, pp.353-364, 1976.
- 6) Zhang, X. and Edwards, J.A.: Computational analysis of unsteady supersonic cavity flows driven by thick shear layers, *Aeronautical Journal*, 92,(919) pp.365-374, 1988