静的制御デバイスによる空力キャビティ音抑制効果*

伊澤 精一郎^{*1}, 黒田 将 史^{*2}
井 門 敦 志^{*3}, 福 西 祐^{*1}

Effect of Static Control Device on Suppression of Cavity Noise

Seiichiro IZAWA^{*4}, Masafumi KURODA,
Atsushi IDO and Yu FUKUNISHI^{*1} Department of Mechanical Systems and Design, Tohoku University,
6-6-01 Aoba-Aramaki, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

This paper describes the effect of a thin plate as a static controlling device to suppress cavity noise when it is inserted vertically into a cavity. Experiments using small and large wind tunnels are carried out to investigate the size effect of the cavity model. From the experimental results, it is shown that there are two optimum plate locations for the noise reduction. One is near the upstream edge and the other is just in front of the downstream edge. By comparing the experiments at small and large wind tunnels, it is found that in the large wind tunnel, noise reduction is not so effective as in the small one.

Key Words: Cavity, Aerodynamic Noise, Resonance, Passive Control, Turbulent Boundary Layer

1. は じ め に

空力騒音の代表であるキャビティ音は古くて新しい問題である。風が溝や空洞(キャビティ)上を通り過ぎるときに音が出る現象自体は古くから知られていたが、飛行機や新幹線、自動車などの高速移動手段の騒音問題としてふたび注目を集めている。特に、航空機の車輪格納庫や列車のパンタグラフ及び車両連結部、また高層建築物のキャビティなどから発生する大きな空力騒音は、周辺環境への影響ばかりでなく、その音圧レベルの高さによってはキャビティ内にある精密機器を破損する恐れも指摘されている。この問題は多くの研究者の関心を集めており、その発生メカニズムを数値シミュレーションによって解明する試み⁽¹⁾⁽²⁾や、キャビティ音の抑制を目指した実験^{(3)~(7)}が最近も多数行われている。なかでも航空機の弾倉に関わるキャビティ問題を取り上げたものが多く、遷音速から超音速の高速流がその研究対象となっている。一方、超音速キャビティによって生じる振動流が作る渦や振動衝撃波を積極的に利用することで、スクラムジェットエンジンの超音速混合や燃焼促進技術への応用を目指した研究もある⁽⁸⁾。本研究では、特にマッハ数の低い領域におけるキャビティ音を制御対象とした。キャビティ音は、キャビティ内に形成される自励振動のフィード

バック機構のはたらきによって、選択的にある単一の周波数にピークが生じやすい。このメカニズムは、マッハ数の高低によらずキャビティ音に共通する音の仕組みである。

これまでに提案された低マッハ数流れにおける制御方法としては、キャビティ上流端の受容性の最も高いところから微小な速度変動波を導入し、このキャビティ流れのフィードバック周波数を強制的に変化させることで騒音を低減させることをねらったものが多い。例えば、Kegerise⁽⁴⁾らは、キャビティ内に設けた圧力センサーによりフィードバックしてくる圧力変動を捉え、キャビティ上流端でピエゾ板から反対称の撓乱波を発生させている。また、Cabell⁽⁵⁾らは同じ実験装置を用いて、キャビティ上流端に設けたスリットからピエゾ素子を動力源とするジェットを噴出させることで、空力キャビティ音の抑制を試みている。これに対して、横川ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾など、キャビティ上流端にピエゾ素子を一列に配置し、その位相のみを制御することでフィードバック周波数を変えることなく騒音を抑制することに成功した例もある。いずれにせよこれらの能動的な制御方法は外部からの動力の供給が必要であり、ピエゾ素子の交換を含めたメンテナンスの問題や、流速に応じてフィードバック周波数が変化することなどを考慮するとその実用化には困難を伴う。また、主流速度一定のもとで実験装置の大きさを実用スケールに近づけるとキャビティ上流の境界層も厚くなるが、ピエゾ

* 原稿受付 2004年7月20日。

^{*1} 正員、東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01)。^{*2} 学生員、東北大学大学院工学研究科。^{*3} 正員、鉄道総合技術研究所(〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)。

E-mail: izawa@fluid.mech.tohoku.ac.jp

素子を用いた制御デバイスのサイズは装置のスケールアップに対応させることが難しいので、アクチュエータによる速度変動の壁面垂直方向導入高さは相対的に低くなってしまふ。さらに、主流速度も大きい場合には導入される速度変動自体が相対的に小さくなるという問題もあって、研究室レベルと同じ騒音抑制効果を期待することは難しい。

そこで本研究では、キャビティ内に主流と垂直に板を挿入するという受動的な制御方法を用い、板の寸法とその挿入位置を変えながら板によるキャビティ音抑制効果を調べた。実験は、はじめ小型の検定風洞でその有効性について検討した後、鉄道総合技術研究所の米原大型風洞にて実用スケールの実験を行い、スケールの違いが消音効果に及ぼす影響についても検討を試みた。

2. 実験装置および測定方法

実験に使用した風洞は、東北大学流体科学研究所 (IFS) の小型風洞と鉄道総合技術研究所 (RTRI) の大型低騒音風洞の2つである。いずれも回流式風洞の測定部を開放型とし、その測定部形状は、それぞれ対面距離 293mm の正八角形と幅 3m × 高さ 2.5m の矩形断面である。一様流中の乱れは、小型風洞で 20m/s 時 0.1% 程度、大型風洞では 100m/s 時 0.2% 以下となっている。

図 1, 2 にそれぞれの風洞で使用した実験装置の概略を示す。小型風洞ではアルミ製の平板供試体を測定部の中央に設置したが、大型風洞では装置も流速も大きく供試体に非常に強い力がかかるため、風洞吹き出し口下面と平板の上面が連続した同一面となるように、供試体を取り付けて実験を行った。また、供試体自身にもアングルで作成したフレームに厚さ 16mm の化粧板を組み合わせることで十分な剛性を持たせるような配慮を行った。キャビティの寸法は、それぞれ主流方向長さが 50mm と 500mm、深さは 27.5mm と 500mm であり、その下流に長さの調節可能な共鳴管を取り付けることでディープキャビティを構成させ、ピーク音が発生しやすくした。なお、キャビティ上流の平板上には、それぞれ直径 0.5mm と 1.5mm のトリッピングワイヤ、小型風洞ではさらに 400 番のサンドペーパーを貼り付けることで、境界層を乱流に遷移させている。流れの2次元性を保つため、いずれの装置についても平板の両側には端板が取り付けられている。一方、キャビティ内に挿入する消音板は、その挿入位置が効率よく変えられるように、大型風洞における実験ではボールねじを用いて主流方向の位置決めが簡単に行えるよう

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus at IFS.

(a) flat plate with cavity

(b) cavity model

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus at RTRI.

に工夫した (図 2(b))。ここで、 H_p は、挿入板の y 方向寸法である。

座標系は、キャビティ上流端中心を原点とし、流れ方向に x 軸、高さ方向に y 軸、スパン方向に z 軸とした。 x 座標については、キャビティ開口部流れ方向長さ L_c を用いて無次元化した。流速の測定には単線および X 型の熱線風速計を用い、音の測定には、小型風洞では装置上の制約からキャビティ真上 300mm、大型風洞では 5m の高さに取り付けたコンデンサマイクロフォンを用いた。測定した音のデータをもとに、周波数 k における音圧レベル (SPL_k) を次式によって求めた。

$$SPL_k = 10 \log_{10} \left(\frac{E_k}{E_0} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 E_k は、マイクロフォンの出力電圧であり、基準電圧 E_0 は 1V とした。なお、実験時の気流速度 U_∞ は、小型風洞で 30m/s、大型風洞では 60m/s である。

Fig. 3 Cavity noise with and without resonator at $U_\infty = 30[\text{m/s}]$ (IFS).

Fig. 4 Mean velocity profiles inside the cavity at IFS.

3. 実験結果および考察

3.1 小型風洞実験 予備実験の結果から共鳴管の長さは140mmとした。このとき、キャビティ上流端 $x=0$ における流入境界層の厚さ δ はおよそ11mmであり、478~480Hz 付近に単一のピークを持った空力騒音が発生している (図3)。この空力騒音が、キャビティ下流端に渦が連続的に衝突して生じる圧力波によって形成されるフィードバックループにもとづいたキャビティ音である。共鳴管を取り付けることで、キャビティ音が大きく増幅されていることがわかる。また、その周波数は、共鳴管の固有周波数に合ってしまうため数 Hz 程度ずれている。1,000Hz 付近に見られる高調波にもこの周波数のずれは表れている。このときのキャビティ内の平均流速分布を、図4に示す。せん断層は下流域に行くにしたがってしだいに厚くなり、キャビティ中央 $x/L_c = 0.5$ の位置では、 $y = -6[\text{mm}]$ の位置に達している。以下の実験に際しては、この480Hzのピーク周波数を制御対象として板による騒音抑制効果について調べることにした。

Fig. 5 Variation of peak level with different plate heights (H_p) and x locations at IFS.

図5は、キャビティに挿入する板の y 方向寸法を変えた場合の結果である。板の上面は上流壁面の延長面に一致しており、そのスパン方向長さは220mmである。図の縦軸は、板がない場合のピーク周波数480Hzの音圧レベルを基準として、これよりも音圧レベルが小さいときをマイナスとして表している。挿入する板のサイズが大きくなるにつれて騒音抑制効果も大きくなり、その効果は最大で60dBに達することがわかる。特に、キャビティの前縁寄り $x/L_c = 0.3$ 付近と後縁近傍での消音効果が大きい。その一方で、 $H_p = 2[\text{mm}]$ の結果のように、板の挿入位置によっては音が逆に大きくなってしまった場合もあった。挿入する板の y 方向寸法が10mmよりも大きくなると、前縁付近を除きどこに板を挿入しても消音効果は約60dBで一定となる。図3に示したように、共鳴管によって増幅されるキャビティ音の大きさもほぼこの60dBに等しいことから、大きな板の挿入により共鳴現象そのものが起きなくなっている可能性がある。すなわち、キャビティ音の音圧レベルが暗騒音のレベルにまで低下したため、それ以上の騒音低下は起こりえないと言い換えることもできる。

本研究で用いた共鳴管は主流に平行に設置されており、下流側は固定端となっているが上流側がキャビティに開放されているため、共鳴長さを正しく見積もることは困難である。そこで、両側が固定端と自由端の場合の共鳴条件

$$f_r = \frac{am}{4L_r} \quad (m = 1, 3, 5, \dots) \quad (2)$$

を用いて、共鳴長さ L_r を逆算を試みた。ここで、 f_r は共鳴周波数、 a は音速、 m は共鳴モードである。 $f_r = 480[\text{Hz}]$ 、 $a = 340[\text{m/s}]$ (実験時の気温約15度)、 $m = 1$ とすると、 L_r は約177mmと求めることができる。

仮想的に上流端を自由端とすると、この位置は、キャビティ前縁から 13mm すなわち $x/L_c = 0.26$ の位置に当たる (図 6 の route 1)。なお、 $m=3$ の場合、 $L_r \approx 531[\text{mm}]$ と長くなってしまうことから、本実験の共鳴モードは $m=1$ モードであることがわかる。また、終端をキャビティ開口部中央 ($x/L_c = 0.5$) の平板と同じ高さ ($y=0[\text{mm}]$) に置く図 6 の route 2 の経路を考えると、共鳴長さは、 $L_r = 178.75[\text{mm}]$ となり、共鳴周波数を約 476Hz と見積もることができる。本実験のキャビティ音のピーク周波数は 478~480Hz 程度であったから、粗い見積もりとしては十分である。

板の y 方向挿入位置を変えたときの消音効果を図 7 に示す。板の y 方向寸法 H_p は 4mm である。挿入位置を 1mm 下げること、前縁のごく近傍を除き消音効果がより高くなっている。板の位置をさらに 3mm まで下げると、前縁よりの $x/L_c = 0.3$ 付近の効果の低下は大きくないのに対し、キャビティ後縁における騒音抑制効果は 1/3 程度にまで低下している。さらに、上流平板より 6mm 以上低い位置まで下げると、その x 方向位置に関わらず消音効果が著しく減少することがわかる。同様の傾向は、 $H_p = 2[\text{mm}]$ および 8mm の板についても観測された。これは、 $y=-6[\text{mm}]$ の高さはせん断層の外縁にあたり、この位置よりも低い位置に板を挿入しても消音効果がないのは、この位置では流速が極めて小さく (図 4) 流れに何の影響も与えていないからであると考えられる。このようにキャビティ前縁に近い領域では板の挿入高さに依存して消音効果が緩やかに変化するが、後縁近傍では板を数ミリ低く取り付けるだけでその効果が激減してしまう現象は、両者の騒音低減メカニズムが異なることを示唆している。

そこで、 $H_p = 4[\text{mm}]$ の板を例にとり、板のスケールが流れに及ぼす影響について調べるため、X 型の熱線風速計を用いてキャビティ内の 2 方向速度分布を測定し、位相ごとの渦度分布を求めた。図 8 にその結果を示す。ここでは、コンデンサマイクロフォンにより計測されたキャビティ音のピーク周波数を基準信号として速度場の情報にアンサンブル処理を施し、それぞれの位相における渦度場を算出している。板を挿入することでキャビティ音が抑制されるとアンサンブル平均を行う際の基準信号としての信号の S/N 比が低下してしまうため、本実験ではバンドパスフィルターをかけることでキャビティ音のピーク周波数を含む周波数帯を抽出し、それを基準信号とする方法で信号の劣化を防いでいる。また、熱線のサポートが平板と干渉してしまうため、測定領域は図中の点線で示した領域に限定した。図の灰色の領域が正の渦度変動を、白い

Fig. 6 Cavity resonance by the resonator with open-closed ends (IFS).

Fig. 7 Variation of peak level with different y locations for $H_p = 4[\text{mm}]$ at IFS.

領域が負 (ゼロを含む) の渦度変動を表している。板を挿入する前に見られた強い渦度変動 (図 8 (a)) は、 $x/L_c = 0.24$ の位置に挿入された板によって、およそ 1/3 以下にまで弱められている (b)。ところがその挿入位置が $x/L_c = 0.6$ になると、渦度変動は再び強くなる (c)。これは、板に到達する前に渦へのロールアップがすでに完了しているので、せん断層の厚さに対して板の y 方向寸法が小さい (図 4) と渦を壊すに至らないためであると考えられる。一方、板を下流端近傍の $x/L_c = 0.84$ の位置に挿入した場合、その上流域では明確な渦度変動のパターンが見られなくなる (d)。一般に渦の衝突により生じる圧力変動の強さは衝突する物体の材質や形状によっても大きく左右されるが、下流端近傍に板があると、キャビティ下流のエッジに衝突する渦自身が直前に変形を受けてあたかもエッジ形状が変わったかのような効果を生み、結果として渦の衝突による圧力変動が緩和されフィードバックループそのものが弱められているものと考えられる。すなわち、板によって渦が変形を受けることで下流端に衝突する渦の強さが弱くなるばかりでなく、それに伴い形

Fig. 8 Contour map of spanwise vorticity fluctuation without plate (a) and with plate ($H_p = 4[\text{mm}]$ and $y = 0 [\text{mm}]$) for various x locations at IFS.

Fig. 9 Cavity noise with resonator and without cavity at $U_\infty = 60[\text{m/s}]$ (RTRI).

成される圧力場にも影響があるものと推測される。したがって、この場合重要なのは板の上端とエッジとの位置関係であり、板の y 方向寸法ではないことになる。図 5 に示したように、キャビティ音の測定結果に関しても、キャビティ前縁の近傍では挿入する板のサイズにより消音効果にばらつきがあったのに対して、下流端近くでは板のサイズによらず消音効果がほぼ等しくなる傾向が見られたのは、このために他ならない。また、下流端に衝突する渦はおよそ $y = -3 \sim 2.5[\text{mm}]$ の範囲内にある (図 8(a)) ことから、この高さよりも低い位置に板を挿入しても渦の衝突にはほとんど影響がないはずである。このことが、図 7 において、キャビティ後縁近傍ではわずか 3mm ほど低い位置に板を挿入するだけで消音効果が急激に減少してしまった現象の原因であると考えられる。

3.2 大型風洞実験 上述の小型風洞による結果をふまえ、次に鉄道総合技術研究所の大型低騒音風洞を用いて実用スケールの実験を行い、スケールの違いが消音効果に及ぼす影響について検討を試みた。キャビティ上流の境界層厚さはおよそ 104mm である。予備実験の結果から共鳴管の長さは 800mm とした。このとき、図 9 に見られるようにスペクトルのピークは 47Hz と 89Hz に 2 つ存在する。小型風洞の場合と同様に、図 6 の route 2 の経路を仮定し共鳴モードを 1 として (2) 式を用いて見積もった共鳴周波数は 85Hz であった。また、周波数の低い方のピークは、共鳴管長さなど主流方向の条件が変わっても変化せず、逆に、キャビティを構成するスパン方向の両サイドの化粧板と実験装置の骨組みであるアングルとの接続部に見られた隙間を埋めることでその周波数が数 Hz 程度低下した。これらのことから、周波数の低い方のピークはスパン方向のキャビティ幅に関係した共鳴現象により生ずるものと考えられ、本研究では注目しなかった。

Fig. 10 Variation of peak level with different plate heights (H_p) and x locations at RTRI.

Fig. 11 Sound suppressing effect with the plate ($H_p = 100$ [mm]) at $x/L_c = 0.2$ and 0.9 (RTRI).

図 10 は、キャビティに挿入する板の y 方向の寸法および x 方向位置を変えた場合の騒音レベルの変化である。板の上面は上流平板の延長面に一致している。小型風洞での実験と比べると上流境界層の厚さが 10 倍になっているので、挿入する板の y 方向寸法も 10 倍としている。図の縦軸は、板がない場合の高周波数 90Hz 側のピーク音圧レベルを基準として、これよりも騒音が低いときをマイナスとして表している。いずれの場合についても、 $x/L_c = 0.2 \sim 0.3$ の辺りで音圧が一旦減少し、その後増加に転じてからキャビティ下流端に近づくにつれて再び減少している。しかし、その効果は板の y 方向寸法により大きく異なり、キャビティ上流のせん断層厚さと同程度のときに最も大きくなることがわかった。小型風洞による実験 (図 5) においても同じ傾向が見られたが、大型低騒音風洞の結果の方が騒音低減効果が小さく、その分布は高めに推移していた。これは実験装置が大きくなると、板自身

から発生する音が無視できなくなることにも影響しているのではないかと推察される。

図 11 は、そのなかでも特に騒音低減効果が大きい 100mm 幅の板を $x/L_c = 0.2$ と 0.9 の位置に挿入した場合について、キャビティ音のスペクトル分布をとったものである。板のない場合に見られたピークは、大きく減少していることがわかる。しかし、キャビティ後縁に近い $x/L_c = 0.9$ の位置に板があると、キャビティ音のピーク周波数においては確かに減少するものの全体的な音圧レベルは上昇していることがわかった。この現象は、小型風洞の実験では観測されていない。

4. ま と め

キャビティ内に主流と垂直に板を挿入するという受動的な方法で、キャビティから発生する空力騒音を大幅に低減することに成功した。挿入位置としてはキャビティ上流端よりの領域と下流端付近が効果的であり、その低減メカニズムはそれぞれ異なるらしいことがわかった。前者の場合、板によって渦の成長が阻害されその結果として騒音が減少しているのに対して、後者では、キャビティ下流端付近に挿入された板によって下流端エッジへの渦の衝突が影響を受け、フィードバックループそのものが弱められている可能性が高い。また、小型風洞と大型風洞で比較実験をした結果、大型風洞では小型風洞ほどの騒音低減効果が得られないという結果が得られた。さらに、後縁に近い位置に板がある場合、キャビティ音のピーク周波数においては音圧レベルが減少するものの全体的な音圧レベルは上昇してしまうこともわかった。これは小型風洞の実験では見られなかった現象であり、騒音低減の詳細なメカニズムと併せて今後の検討課題である。

文 献

- (1) Gloerfelt, X., Bogey, C., Bailly, C. and Juve, D, *AIAA Paper*, 2002-2476 (2002), 1-12
- (2) Gloerfelt, X., Bogey, C. and Bailly, C, *DLR Göttingen* (2002), 1-12
- (3) Cattafesta III, L. N., Garg, S. and M. Choudhari, F. Li, *AIAA Paper*, 1997-1804 (1997), 1-12
- (4) Kegerise, M. A., Cattafesta III, L. N. and Ha, C., *AIAA Paper*, 2002-3158 (2002), 1-10
- (5) Cabell, R. H., Kegerise, M. A, Cox, D. E. and Gibbs, G. P, *AIAA Paper*, 2002-2497 (2002), 1-10
- (6) Yokokawa, Y., Fukunishi, Y., *International Journal, Theoretical and Applied Mechanics*, 50 (2001), 281-287
- (7) 横川 譲, 福西 祐, 機論 68-685, B (2002), 72-78.
- (8) 浅井 智広, 西岡 通男, ながれ, 22 (2003), 131-145