

ホールトーンの低減に適切なタブの研究

中園 与一*

A Study of Effective Tabs for Reduction of Hole Tone

by

Yoichi Nakazono

(Received: September 2010, Accepted: February 2011)

Abstract

The effective number of tabs and tab height in reducing the hole tone have been studied by carrying out the acoustic measurement, and the measurement of mean velocity, velocity fluctuation and flow visualization. As a result, the suited tab is the height higher than one tenth of nozzle diameter and 4 or more number of tabs. The collapse of a vortex before reaching an end-plate damps the pressure fluctuation generated at the end-plate, thereby reducing the hole tone.

Keywords: Hole tone, Tab, Noise reduction, Velocity contours, Flow visualization

1. はじめに

火力発電所のプラント施設において、高速流 (0.2<M) が流れている配管から異常音が発生し、その低減が問題となっている。最近この原因が、バルブ位置での配管からのホールトーンに起因しているらしいということが現場の実測で分かってきた。しかし、既に配管した状態の中で、如何に異常音を低減させるか困難を来している。消音させる方法として、渦が衝突する下流部のエッジを傾斜させる方法が当初提案されたが、結局配管された状態と接続の条件によって設置は厳しいことも指摘された。そこで、バルブの取り付け前部の管にタブを装着する方法が考えられている。しかし、タブに関する適切な形状は不明な状況で、その適切な形状が望まれている。

ホールトーンについては、かなり多く研究されている^{1),2)}。その代表的なものとして、Chanaund & Powell¹⁾による低速ジェットの研究が知られている。彼らによると、ホールトーンの発生機構はエッジトーンの発生機構と類似している。またジェットの渦がエンドプレート部

の入口部に衝突して発生した圧力変動がノズル出口に帰還作用を起こして、せん断層と干渉し、それらが繰り返されることによって生じるフィードバック共鳴音がある。

タブは超音速ジェット騒音のスクリーチ音を低減させるために有効な手段である。これはタブにより主流渦を発生させてジェット流を歪ませ、ジェットの混合を促進させることによってスクリーチ音を低減させようとする方法である^{3),4)}。ホールトーンの発生機構は超音速ジェットのスクリーチ音の機構と類似しているため、タブはホールトーンの低減に有効と考えられる。著者^{5),6)}はこのタブに注目して、消音器やホールトーンへの有用性を流れの組織構造と流れの可視化を通じて、タブによる騒音低減を明らかにした。しかし、効果的なタブ数やタブ高さ等の形状については明らかにしなかった。これまでホールトーンとタブの関係については知られていないようである。

そこで、この論文では、現場でのタブ設計のため、ホールトーンの低減に効果的な三角タブの高さとタブ数について述べる。

* 東海大学産業工学部機械システム工学科 教授

2. 実験装置及び方法

Fig.1 に実験装置を示す。実験は半無響室 (3.6m×3.6m×2.6m) にて行われた。コンプレッサーから送風された空気は上流の音を消音するマフラーを通過後、プレナム室に流れ、このプレナム室に取り付けられているノズルより大気に噴出される。噴出されたジェットは下流側に設置されている可動式板 (エンドプレート) に衝突する。この板の中心にノズル径と同じ径の穴 (ホール) が設けられている。使用したノズルの直径Dは 20, 30, 40mm である。

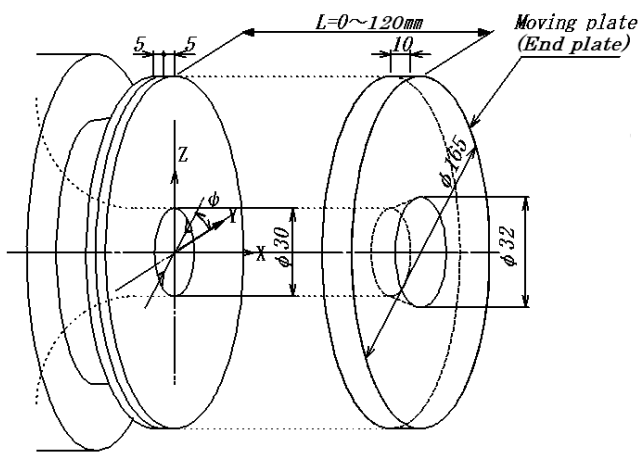


Fig.1 Experimental apparatus

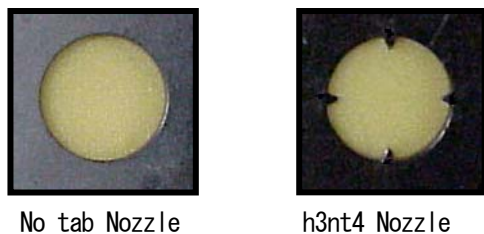


Fig.2 Nozzle configuration (D=30mm)

円形ノズル縁には、底辺と高さが等しい三角形のタブが取り付けられている。タブの代表的な形状を Fig.2 に示す。実験に使用したタブの高さ h は 1mm~5mm, タブ数 nt は 2~16 個である。ノズル面積に対するタブの総面積の比 (ブロックージ) は噴出流量を落とさないために、一部を除くと、5%以内とした。本文中において h3nt4 のようなタブの形状を表す記号で、h の後の数字はタブ高さ、nt の後の数字はタブ数を示す。ノズルとエンドプレート間の距離 L は 0~120mm で、流速はマッハ数 0.2~0.7 の範囲で行った。

発生されたホールトーンはジェット軸に対して 90° , ノズル出口から 600 mm の位置に 1/4 インチマイクロホン置き、マイクロホン電源 (F 特性) を通じて、FFT アナライザーで周波数分析した。発生音はエンドプレートをノズル出口からジェット下流側へ 2 mm ごとに移動する度に計測した。

ジェット内の平均速度と速度変動分布は、I 型熱線(直径 5μm)プローブを、ステッピングモータにて X 方向は 2 mm ごと、Y・Z 方向は 0.1mm ごとに移動して、計測した。またスモークワイヤ法を用いて流れの可視化を行った。この場合の流速は 5 m/s とした。

3. ホールトーンの発生機構

ホールトーンには二つのタイプがある。一つはジェットがエンドプレートに衝突して圧力変動を発生してノズル出口にその音波が戻り、せん断層と干渉して発生する共鳴音(フィードバック共鳴音), もう一つはノズル出口とエンドプレート間の形状に基づく共鳴音である。

フィードバック共鳴音の周波数は^{5),7)}

$$f_{en} = \frac{n - \alpha}{\beta + \sqrt{1 + \frac{(\kappa - 1) \cdot M^2}{2}}} \cdot \frac{U_0}{L} \quad (1)$$

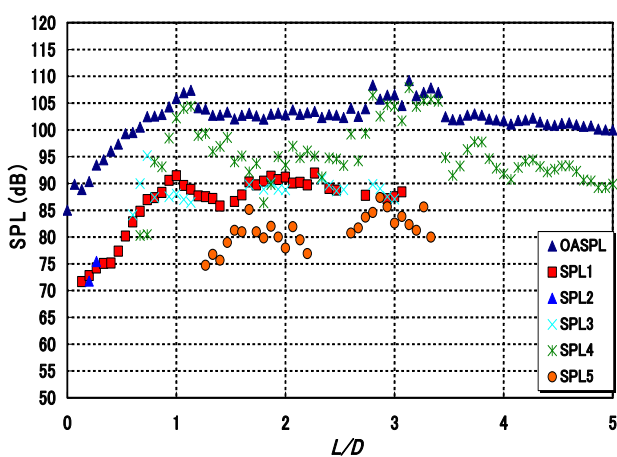
によって表され、プレート間の形状に基づく共鳴周波数は⁵⁾

$$f_{Ln} = \frac{n a_0}{2 L} \quad (2)$$

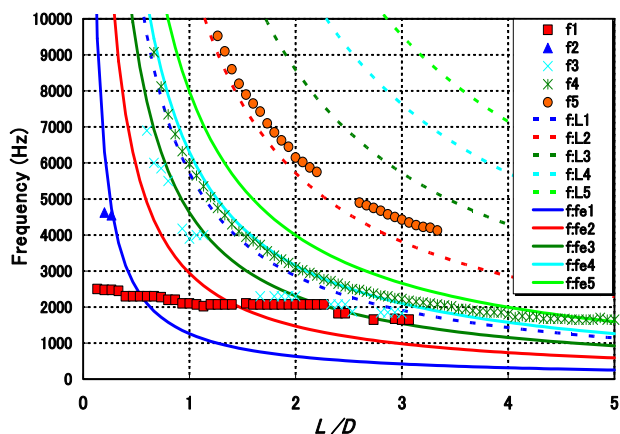
によって表される。但し、 U_0 はノズル出口でのジェットの流速、 M はマッハ数、 a_0 は大気音速、 L はノズル出口とエンドプレート間の長さ、 κ は比熱比で 1.4、 n は共鳴音のモードを示す係数で、1, 2, 3... である。 β は渦の移流速度とジェット流速の比で、渦の移流速度の実測より求めた平均値 0.53 である。 α はエンドプレートからノズル出口への音波の到達とノズル出口での渦放出の間の位相差を表し、Rossiter による経験値 0.25 である⁷⁾。

Fig.3(a), (b) にマッハ数 0.35 に関するホールトーンの音圧レベルと周波数をエンドプレートの移動距離の関数としてそれぞれ示す。これらのホールトーンのデータは

後述する Fig.4 に示すような音圧スペクトルにおける卓越した音圧をプロットして求めた。Fig.3(a)の SPL_mと Fig.3(b)の f_mは音圧スペクトルにおける同じ音響特性を有す卓越音の音圧レベルとその共鳴周波数で計測値である。但しmは各モードを示す係数で、1, 2, 3, ...である。ここでは、音響モードをホールトーンの基音とその倍音及びその他のモードに分類した。即ち、SPL₁ は共鳴周波数 f₁ の音圧レベルである。OASPL はオーバーオール音圧レベルである。Fig.3(b)の f_{fe1}, f_{fe2}...は式 (1) から求めたフィードバック共鳴周波数の計算値で、f_{L1}, f_{L2}, ...は式 (2) から求めた形状に基づく共鳴周波数の計算値である。



(a) Sound pressure level vs. nozzle to end plate distance.



(b) Resonant Frequency vs. nozzle to end plate distance.

Fig.3 Sound characteristic of hole tone, M=0.35, D=30mm, No Tab.

Fig.3(a)から大きな発生音は*印の SPL₄ で、L/D =1 と L/D =3 付近に音圧のピークが見られる。(b)図をみると、卓越音 SPL₄ はフィードバック共鳴音の周波数 f_{fe4} と形状共鳴音の周波数 f_{L1} の両方に影響されていることがわかる。すなわち、両者の共鳴周波数が近いためロックイン現象を生じたと考えられる。卓越音 SPL₅ は形状共鳴音の第 2 モードと一致する。しかし、この音圧はオーバーオールの音圧にはそれほど寄与しない。ノズル出口から L/D =3 まで 2000Hz を中心として一定な周波数の音が発生している。この周波数を、ノズル直径 D を代表長さとしてストローハル数で表すと、0.5 に相当する。また、このストローハル数の音は他のマッハ数では見られなかったため、ジェットより上流のプレナムチャンバからの発生音が伝播したものと考えられる。しかし、このストローハル数の音圧レベルは SPL₄ より 10dB 以上低く、またホールトーンでもないため、ここでは研究対象外とする。

次に各マッハ数について、オーバーオール値に最も影響しているホールトーンのモードを調べた。本論ではマッハ数 0.35 を除いて図示していないが、マッハ数 0.25, 0.3, 0.35 の場合、フィードバックモード f_{fe4} と形状モード f_{L1} に影響された発生音が最も大きく、マッハ数 0.4 以上では f_{fe3} と f_{L1} が最も主要な発生音を示すことがわかった。なお全ての高マッハ数でこれらフィードバック音と形状モードの共鳴音の周波数は近い周波数帯にあり、ロックイン現象が考えられる。

4. タブ形状の発生音への影響

Fig.4 はノズル直径 D=20mm, ノズルとエンドプレート間距離 L=40mm (L/D=2)での発生音の音圧スペクトルを示す。タブ高さ h は 1mm (h/D=0.05) に固定してタブ数 nt の影響を調べた。4600Hz 付近とその倍音に卓越した発生音が見られる。図からタブ数を 8 個に増やしてもタブによるホールトーンの低減は見られない。同様に、ホールトーンを除いた広帯域の音圧スペクトルにもタブ数の影響は殆ど見られない。

タブ高さを 1mm にして、L/D を変化したときのホールトーンの高さをプロットした結果を Fig.5 に示す。音圧レベルはホールトーン第 1 モードでの音圧レベル

である。図からタブがない場合やタブ数が少ない場合、ノズル出口に近いところから下流側にわたって大きな音が発生する。タブ数が多くなると、ノズル出口近くでは音圧レベルは低いが、 $L/D = 1.5$ 以後では大きな発生音を示している。この現象は、本論では図示していないが、タブ高さを高くしたときも同様に、タブ数が増えるとノズル出口近くでは音圧レベルは低く、 $L/D = 1.5$ 以上では音圧レベルは大きくなった。ノズル出口に近いエンドプレート位置で、ホールトーンが小さいのは、タブ数が多くなると、縮流が生じるためエンドプレートへのジェット衝突が弱くなって、発生音が小さくなったと考えられる。

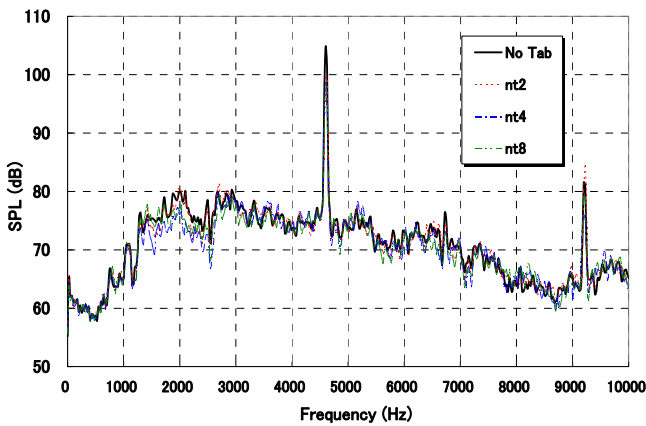


Fig.4 Sound pressure spectra, $D=20\text{mm}$, $L=40\text{mm}$ ($L/D=2$), $h=1\text{mm}$.

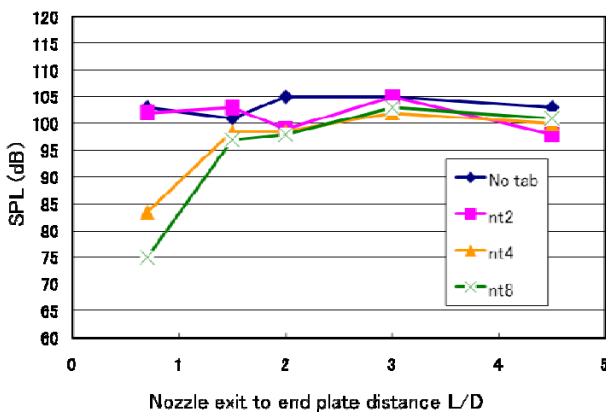
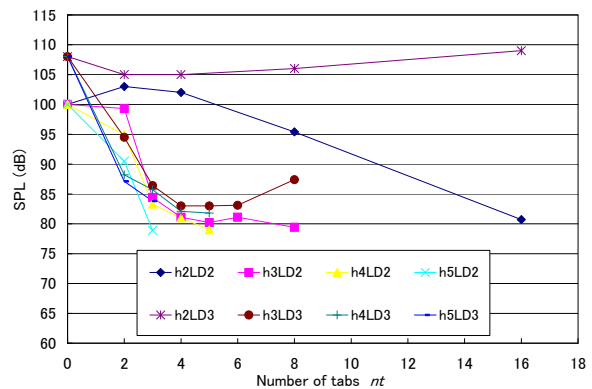
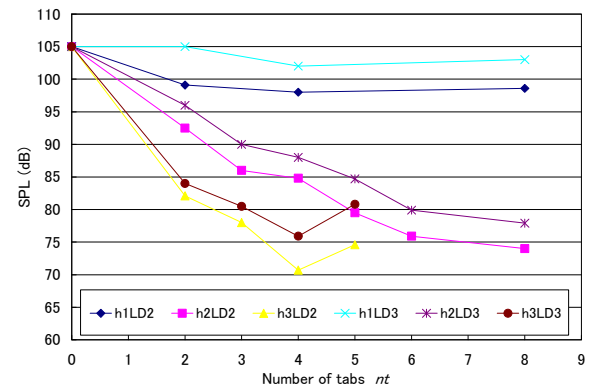


Fig.5 Sound pressure level of hole tone as a function of L/D , $D=20\text{mm}$, $M=0.35$, $h=1\text{mm}$.

次にタブ高さを一定にしてタブ数を変化したときの第1モードのホールトーンを調べた。Fig.6 (a)にノズル直径

20mm の $L/D=2$ と 3 におけるホールトーン第1モードの音圧レベルを示す。図中の LD は L/D を意味し、例えば $LD2$ は $L/D=2$ である。図から、タブ高さが高くなると、音の低減が大きくなり、またタブ数の増加により音も低減するのがわかる。 $L/D=2$ に注目すると、タブ高さが 1mm の場合、ホールトーンは低減しないが、タブ高さが 2mm の場合 6 個以上、タブ高さが 3mm の場合タブ数が 4 個以上のとき、発生音はより低減されることが



(a) $D=20\text{mm}$

(b) $D=30\text{mm}$

Fig.6 Sound pressure level as a function of number of tabs, $M=0.35$.

わかる。この図では、比較のため、ホールトーンが発生しなかった場合についても、ホールトーン周波数での音圧レベルを図示している。

Fig.6 (b)はノズル直径 30mm での $L/D=2$ と 3 におけるホールトーンの音圧レベルを示す。図から、タブ高さやタブ数が大きくなると、発生音の音圧レベルは低くなることがわかる。タブ高さが 2mm の場合、タブ数が多くなると、 $L/D=2$ においては音圧レベルが低下するのに対

して、 $L/D=3$ においては、タブ数が多くなると、音圧レベルの低下は見られず、ホールトーンが発生する。これらの原因は、ノズル出口に近いほうでは、Fig.5 にて述べたように、縮流が生じて、エンドプレートのエッジへの渦の衝突が弱くなり、一方 $L/D=3$ でホールトーンが発生するのは縮流後、渦が形成されたためと思われる。タブ高さが 3mm の場合は、 $L/D=3$ においてタブ高さが 2 mm ほど顕著でないが、タブ数が 8 個で、タブ数 6 個よりホールトーンがわずかに大きくなっている。82dB 以下の場合、 $L/D=2$ と 3 においてはホールトーンは広帯域の音圧スペクトルから判断して殆ど見られなかった。ここでは、傾向を見るために、Fig.6 と同様に、ホールトーンの周波数での広帯域の音圧レベルも載せている。

次に、適切なタブを選定するため、 $L/D=1, 2, 3$ の位置について判定基準表を作成した。それらの結果を Table 1 (a),(b), (c)に示す。表にはノズル面積に対するタブ面積のブロック率も示す。ホールトーンが発生していないときを○、広帯域音圧スペクトルの音圧レベルよりホールトーンが 0~5dB 卓越したときを○、5~10dB 未満を△、10dB 以上を×として、判定表を作成した。

判定にあたっては $L/D=1, 2, 3$ において、表中の該当するタブ高さやタブ数での結果が○と◎のみとき（△あるいは×を含まないとき）を、適切な形状とした。

Table 1(a), (b), (c)から次の結果が得られた。タブ選定として、(1) nt が 2 個は不適、(2) $h/D < 0.1$ の場合、不適、(3) $h/D = 0.1$ の場合、ノズル直径 20mm では nt が 6 個以上、ノズル直径 30, 40mm では nt が 4 個以上で適切、(4) $0.1 < h/D \leq 0.15$ の場合、nt が 4 個以上で適切、(5) $h/D > 0.15$ の場合、nt が 3 個以上で適切であることがわかる。

$h/D = 0.1$ の場合、ノズル直径 20 mm と 30 mm において、適切なタブ数が異なるが、これはノズル出口での境界層厚み(ノズル出口でのジェット剪断層厚み)の影響と思われる。

以上のことから、タブ設計においては、基本的にはタブ高さをノズル直径の 0.1 倍以上にして、タブ数を多くすれば良い。すなわちブロック率を大きくすれば、ホールトーンの低減は可能であるが、流量も落ちるので、むやみに大きくすることは避けなければならない。また、必ずしもブロック率には左右されない。例えば、ノズル

直径 30mm の場合、タブ形状 h3nt4(ブロック率 2.55%) は適切と判断されたのに対して、h4nt3(ブロック率 3.4%) は不適と判断された場合もある。一方、ノズルとエンドプレート間間隔がノズル直径の 1 倍以下の場合、タブ高さをノズル直径の 0.1 倍以下に設定してタブ数を多くすれば良い。

実際の現場においては、 $L/D=1$ 強程度が多いので、 $h/D=0.1$ で、nt=6 ないし 8 程度、もしくは $h/D=0.13$ で nt=4 に設計すればよいと思われる。

5. 流れ場の速度分布と可視化

Fig.7 に $X=15\text{mm}$ ($X/D=0.5$), 75mm ($X/D=2.5$) における No tab, h2nt4, h3nt4 ノズルの速度等値線図を示す。この場合のノズル直径 D は 30mm, ジェットマッハ数は 0.25, ノズルとエンドプレート間の距離は $L=80\text{mm}$ ($L/D=2.7$) である。等値線図は、1/4 円分割図から円形全体の速度分布の形は推測できるので、1/4 円分割図で示している。ノズルとエンドプレート間の距離は $L=80\text{mm}$ である。図から h2nt4 ノズルは No tab ノズルに近い軸対称な速度分布図を示している。即ち、タブ高さが低い ($h/D=0.07$) 場合、No tab に比べて噴流の速度分布は大きく変化しない。このことは渦がタブにより影響されず、そのまま下流側に移流していると考えられ、この現象はスモークワイヤを用いた可視化でも確認された。タブ高さが低くタブ数が多い場合、ノズル出口の上流側では縮流が生じ、エンドプレートのエッジに渦が衝突しないためにホールトーンが発生しないと思われる。

No tab ノズルのノズル出口での速度分布の計測によると、せん断層厚さ(境界層厚さ)は約 2 mm ($h/D=0.07$) であったので、タブ高さはノズル出口での流れの境界層厚さより大きく設計されるべきであるということがわかる。タブ高さが 3mm ($h/D=0.1$) になると、タブ側の位置で流れは凹状の等速度コンターを示し、エンドプレート近くでは凹部と凸部分布がさらに明瞭になっている。これはタブにより、主流方向の渦が形成されて、下流側にいくにつれてこの渦は成長し、崩壊する。このことで混合が促進されたため、エンドプレート近くでは流速が小さくなり、ホールトーンも低減されるためである。

Table 1(a) Suited tab configuration,
 $D = 20\text{mm}$, $M = 0.35$.

D = 20 mm							
h(mm) (h/D) \ nt		nt					
		2	3	4	5	6	8
1 (0.05)	Blockage	0.32%	—	0.64%	—	—	1.28%
	L/D = 1	×		×			△
	L/D = 2	×		×			×
	L/D = 3	×		×			×
2 (0.1)	Blockage	1.27%	1.91%	2.55%	3.18%	3.82%	5.1%
	L/D = 1	×	×	×	△	○	◎
	L/D = 2	×	△	△	○	◎	◎
	L/D = 3	×	×	×	△	○	○
3 (0.15)	Blockage	2.86%	4.3%	5.73%	7.16%	—	—
	L/D = 1	×	△	○	◎		
	L/D = 2	△	○	◎	◎		
	L/D = 3	△	○	◎	○		

Table 1(c) Suited tab configuration,
 $D = 40\text{mm}$, $M = 0.35$.

D = 40 mm							
h(mm) (h/D) \ nt		nt					
		2	3	4	5	6	8
3 (0.08)	Blockage	0.72%	—	1.43%	—	—	2.87%
	L/D = 1	×		×			◎
	L/D = 2	×		△			○
	L/D = 3	×		△			△
4 (0.1)	Blockage	1.27%	1.91%	2.55%	3.18%	—	5.1%
	L/D = 1	×	△	○	○		◎
	L/D = 2	×	○	◎	◎		◎
	L/D = 3	×	○	◎	◎		○
5 (0.13)	Blockage	1.99%	2.99%	3.98%	4.98%	—	—
	L/D = 1	×	△	○	◎		
	L/D = 2	×	◎	◎	◎		
	L/D = 3	△	○	◎	◎		

Table 1(b) Suited tab configuration,
 $D = 30\text{mm}$, $M = 0.35$

D = 30 mm								
h(mm) (h/D) \ nt		nt						
		2	3	4	5	6	8	16
2 (0.07)	Bloc	0.56%	—	1.13%	—	—	2.26%	4.53%
	L/D = 1	×		×			×	◎
	L/D = 2	×		×			×	○
	L/D = 3	×		×			×	×
3 (0.1)	Bloc	1.27%	1.91%	2.55%	3.18%	3.82%	5.1%	—
	L/D = 1	×	×	○	○	◎	◎	
	L/D = 2	×	○	◎	◎	◎	◎	
	L/D = 3	×	○	○	○	○	○	
4 (0.13)	Bloc	2.26%	3.4%	4.53%	5.66%	—	—	—
	L/D = 1	×	△	◎	◎			
	L/D = 2	×	○	◎	◎			
	L/D = 3	△	○	◎	◎			
5 (0.17)	Bloc	3.53%	5.3%	—	—	—	—	—
	L/D = 1	×	○					
	L/D = 2	△	◎					
	L/D = 3	○	○					

Bloc. : Blockage

◎ : No hole tone (0 dB), ○ : above 0 – below 5dB

△ : above 5 – below 10dB, × : above 10dB

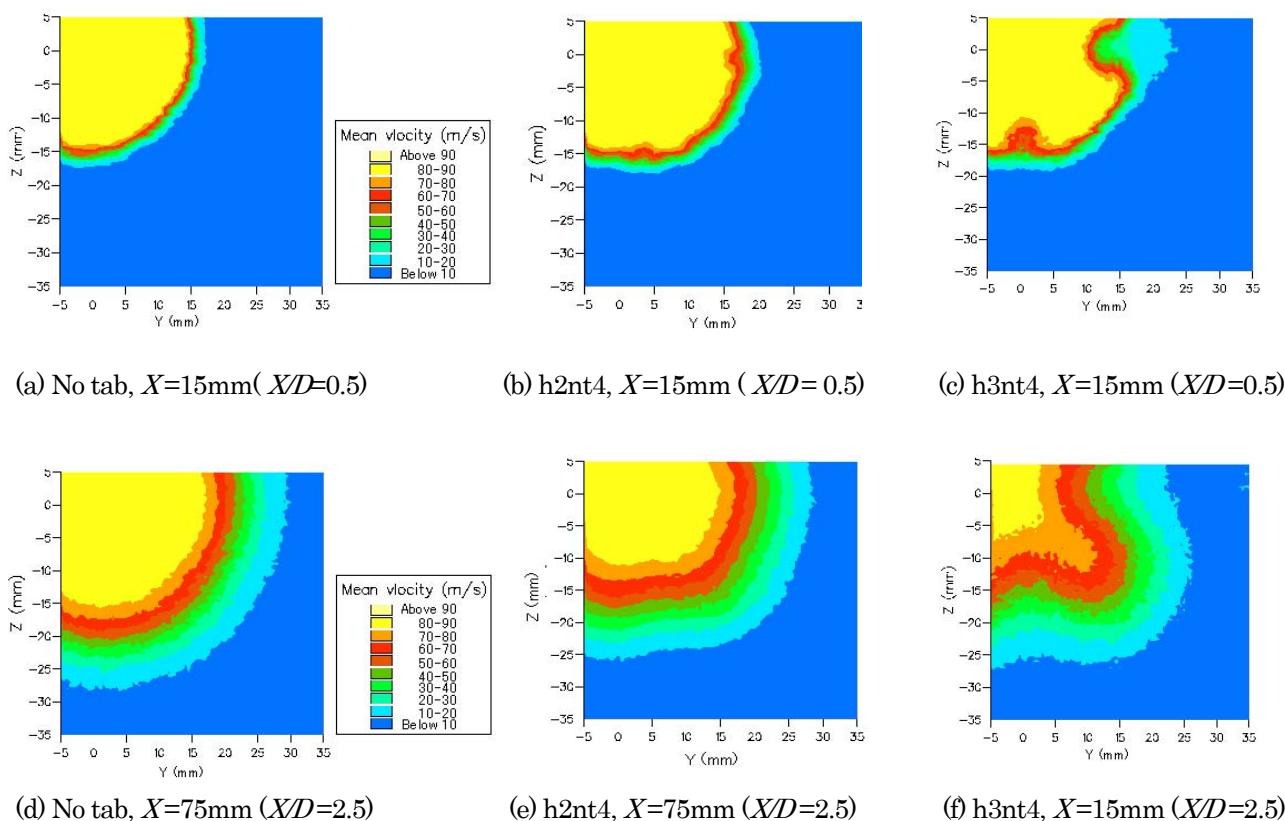


Fig.7 Velocity contours at X sections of 15mm and 75mm, $M=0.25$, $D=30\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ ($L/D=2.7$).

次に、乱れ強さがどのようにになっているのか、No tab と h3nt4 のノズルについて速度変動 (乱れ強さ) 分布を調べた。XY の断面の乱れ強さを Fig.8 に示す。図からタブが無い場合、強い乱れはエンドプレート付近にあることがわかる。タブがある場合、タブのある側の XY 断面ではノズルに近いところから比較的強い乱れが下流側まで形成されている。しかし、タブが無い位置の XY 断面では乱れは小さくなり、また強い乱れの位置は上流側にシフトするだけでなく、外側に広がっていることがわかる。それゆえ、h3nt4 の場合渦がエンドプレートのエッジに衝突しないため、発生する圧力変動も小さくなったと考えられる。

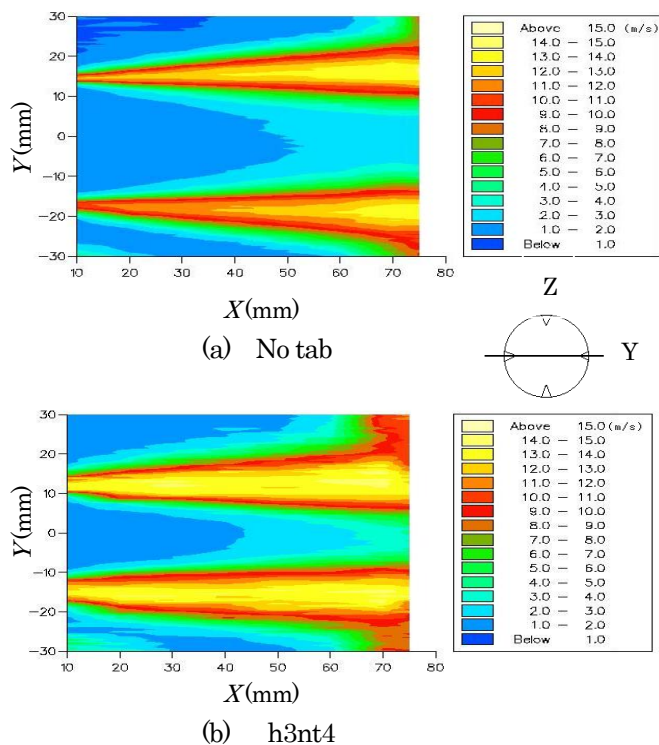


Fig.8 Fluctuation velocity contours of XY section, $M=0.25$, $D=30\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ ($L/D=2.7$).

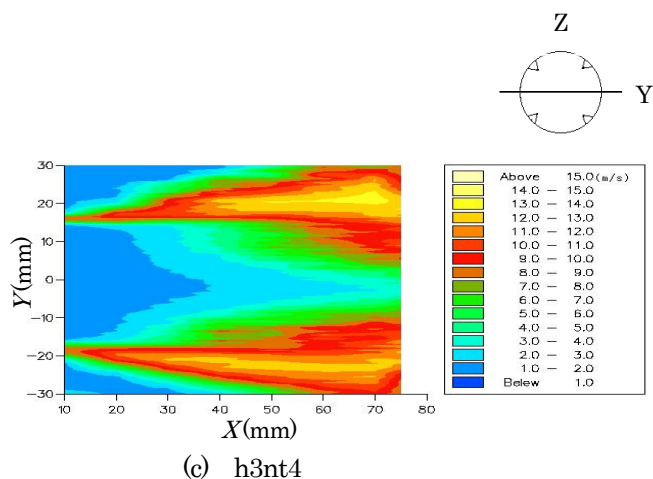


Fig.8 Fluctuation velocity contours of XY section,
 $M=0.25$, $D=30\text{mm}$, $L=80\text{mm}(L/D=2.7)$.

6. まとめ

本研究から次の結論が得られた。

- 1) ホールトーンは亜音速マッハ数ではノズルとエンドプレート間の間隔に基づいた形状による共鳴音と音波のフィードバック音がロックインしたときに強い共鳴音が発生される。
- 2) ホールトーンを低減するのに効果的なタブはタブ高さをノズル直径の 0.1 倍以上にして、タブ数を多くすればよい。
- 3) タブ高さがノズル直径の 0.1 倍以下の場合、ホールトーンの低減としては効果的でないが、タブ数を多くすると、ノズルとエンドプレート間隔がノズル直径の約 1 倍以内においてホールトーンの低減が行われる。
- 4) ホールトーンは渦がエンドプレートに衝突したときに発生し、渦が崩壊されて、渦の衝突が無い場合発生しない。

近年、エネルギー問題で火力発電所と原子力発電所が再びクローズアップされているが、反面、現場では、配管系におけるホールトーンの低減が差し迫った課題となっている。この論文は現場に情報を提供するという意味を込めて、2000年～2002年度研究した内容を再整理したものである。

本論では、タブが流れ場の圧力変動とその周囲の近距離音場に及ぼす影響等については、紙面の関係で省略した。次の機会に譲る。

本実験にご協力をいただいた 2000～2002 年当時の生産工学専攻院生、谷杉竜宏氏(現在 JR 西日本テクノス勤務)と川口太生氏(現在矢野特殊自動車勤務)に感謝の意を表します。

また本論文をまとめるに際してご協力いただいた岡野バルブ製造株式会社の技術研究所長田中孝治氏、技術担当課長川端邦博氏、営業統括課長補佐畑中紹児氏、岡野商事株式会社の広島支店長山本隆志氏、武宮史明氏、及び日立パブコック株式会社の火力技術本部主任技師下野展雄氏、技師民部敏介氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Chanud, R.C. and Powell, A.: Some Experiments concerning the Hole and Ring Tone, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.37, No.5, (1965), 902-911.
- 2) Ahuja, K.K., Massey K.C. and D'Agostino, M.S.: Flow/Acoustic Interactions in Open-Jet Wind Tunnels, AIAA Paper 97-1691, (1997), 794-803.
- 3) Bradbury, L.J.S. and Khadem, A.: The Distortion of a Jet by tabs, J. Fluid Mech., Vol.70, part 4, (1975), 801-813.
- 4) Samimy, M., Zaman, K.B.M.Q. and Reeder, M.F.: Effect of Tabs on the Flow and Noise Field of an Axisymmetric Jet, AIAA Journal, Vol.31, No.4, (1993), 609-619.
- 5) Nakazono, Y.: Effect of Tabs on the Reduction of Acoustic Feed-back Resonance, AIAA Paper 99-1828, (1999), 193-202.
- 6) Nakazono, Y. and Kawaguchi, T.: Effect of Configuration on the Reduction of Hole Tone, Proceedings of Inter-noise 2004, 258, (2004).
- 7) Rossiter, J.E.: Wind Tunnel Experiments on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds, Ministry of Aviation RM 3438, (1964).