

音響インテンシティ法によるホールトーンの発生機構に関する研究<sup>\*1)</sup>

瀬戸 邦聰、伊藤 亮 (佐賀大学 機械工学)

1 緒言

流れによって発生する騒音は、ジェット騒音のように流体そのものが音源になる場合や、プロペラの羽根による騒音のように気流に周期的に作用する力が音源となる騒音がある。この他に、特定の形状、設置状態の物体と気流とが干渉し、発生する騒音がある。ホールトーンは、その干渉音の一つで、エッジを有するオリフィス板が円形ジェットと同軸に置かれたときに発生する。この場合、ジェット出口に続く第二の孔、即ちオリフィスのところで軸対称な擾乱が起り、ジェット出口の擾乱を誘発し、これらの繰り返しのフィードバック機構が形成される。この発振機構についての研究はいくつかおこなわれているが、オリフィス板の前方（噴流が衝突する面）、後方（対面）から放射するそれぞれの音の伝播パターンに関する研究はあまりなされていない。

本研究では、亜音速噴流の場合に発生するホールトーンについて、音のエネルギーとその流れの方向をベクトル表示することでユークリッド空間中にとらえることができる音響インテンシティ法（以下、S. I. 法）を用い、音響エネルギーの強度分布からフィードバック機構によって発生する音の伝播特性を調べる。

2 実験理論

S. I. は任意点における音の進行方向と直行する単位断面積を単位時間に通過する音のエネルギーを表すものでベクトル量である。

2 マイクロホン法による S. I. の値 $I$  は空間2点の平均音圧とオイラーの運動方程式より近似的に導かれる粒子速度の積から以下の式で定義される。

$$I(t) = -\frac{P_A(t) + P_B(t)}{2\rho d} \int_0^T \{P_B(\tau) - P_A(\tau)\} d\tau$$

$P_A(t), P_B(t)$  はマイクロホン分離距離 $d$  間の音圧、 $\rho$  は媒質密度、オーバーラインは時間平均を表す。また、FFTに基づくクロススペクトル法では次の式となる。

$$I(\omega_I) = \frac{\text{Im}[G_{AB}]}{\omega_I \rho d}$$

$\text{Im}[G_{AB}]$  は音圧 $P_A(\tau), P_B(\tau)$  間のクロススペクトルの虚数部、 $\omega_I$  は各周波数を表す。

3 実験装置・方法

実験で使用する噴流はコンプレッサーで圧縮された空気をエアークリーニングセパレータで冷却、エアードライアで乾燥された後、エアータンクに貯蔵し、最後にオイルミストフィルタによって油分除去され、バルブを手動で操作することによって集合胴内の圧力を一定に保ちながら、出口口径 10mm 先細角 30° の先細ノズルを使用して半無響室内に噴出することにより得られる。半無響室内のノズル周辺には音の反射を抑えるため、吸音材としてスポンジが敷き詰められており、その効果は十分に確認され、自由音場として考えてよい。また、噴流と同軸上にノズル出口口径と同じ 10mm の円形オリフィスを中心と有する高さ 230mm、幅 200mm、厚さ 10mm のオリフィス板を設置する。本実験では、傾斜角 30° と傾斜角 0° のオリフィスを有する二種類のオリフィス板を用いる。

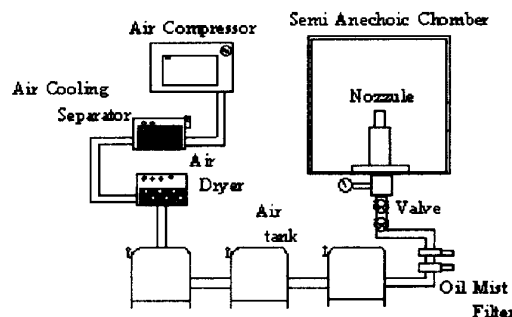


図1 実験装置（全体図）

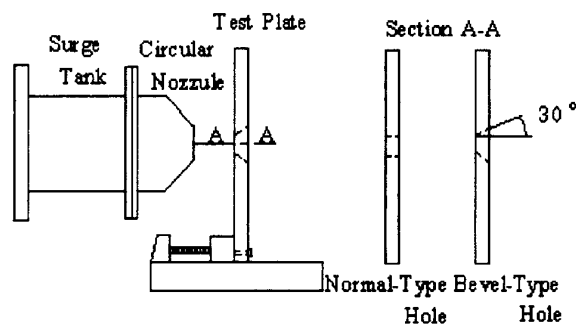


図2 実験装置（ノズル・オリフィス板）

流速は全圧、静圧をピトー管から接続された水銀マノメータで測定し、計算により求める。音響測定はまず、周波数特性を調べるために図3に示すオリフィス板の前面から X、Y 軸方向 250mm の位置と X 軸方向 -250mm、Y 軸方向 250mm で X 軸に

\*1) Study on the mechanism of the generation of a hole tone by using Sound Intensity Technique  
By Kunisato Seto, Akira Ito

45° 方向にマイクロフォンを設置してオリフィス板前方、後方の音圧測定を行う。

次に、ホールトーンの音場解析を行うために図4に示すX軸方向-300mmから300mmまで20mm間隔で31点、Y軸方向に180mmから380mmまで20mm間隔で11点、合計341点のそれぞれ2軸方向のS.I.を測定する。測定方法は、半無響室におかれたマイクロフォン移動装置にS.I.マイクユニットを設置し、マイクロフォンから取り込まれた信号はプリアンプで増幅され、FFTアナライザ内でS.I.が計算される。パーソナルコンピュータは移動装置とGP-IBを介したFFTアナライザを制御しており、自動測定される。

ここで、ノズル-オリフィス板距離を  $h$  [mm]、ノズル出口口径を  $d$  [mm]、ノズル出口速度を  $U_0$  [m/s]、周波数を  $f$  [kHz]、S.I.測定による中心周波数を  $f_c$  [kHz]、圧力比  $P_0/P_a$  は集合筒全圧  $P_0$  を大気圧  $P_a$  で除したものとする

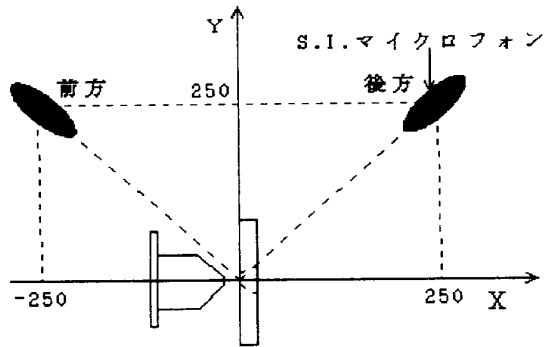


図3 音圧測定図

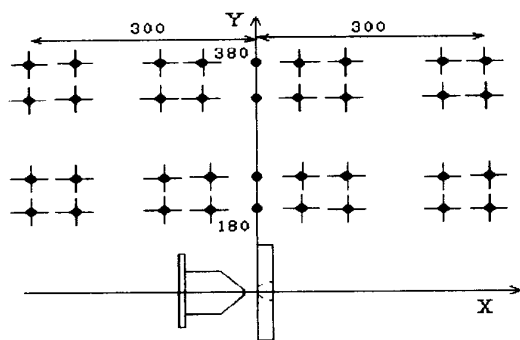


図4 S.I.測定図

#### 4 実験結果及び考察

図5、6には  $h/d = 1$ 、 $U_0 = 146.82$  [m/s] のときの周波数特性の結果を示す。グラフの縦軸は音圧レベル、横軸は周波数、奥行きは図5をマッハ数  $M(U_0 = 340$  [m/s])、図6を  $h/d$  とする。この結果図5より、ノズル-オリフィス板距離が一定で流速が増加すると最大ピークをもつ周波数は高い方に移動する。また図6より、流速一定でノズル-オリフィス板距

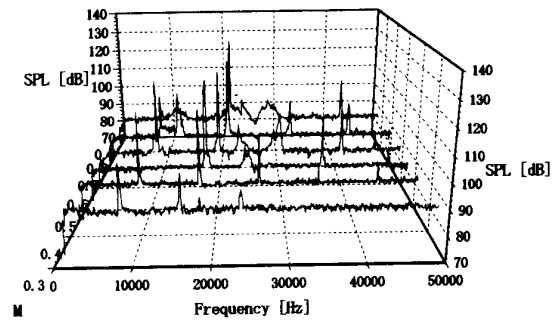


図5  $h/d = 1$  の周波数特性

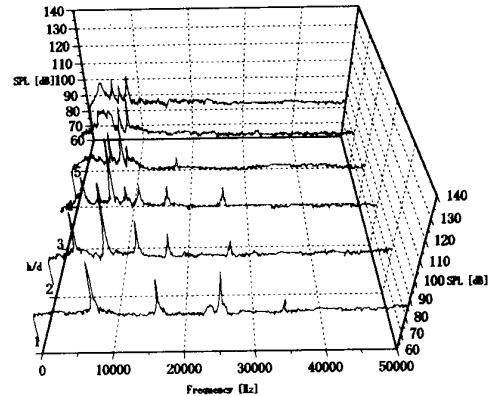


図6  $U_0 = 146.82$  [m/s] の周波数特性

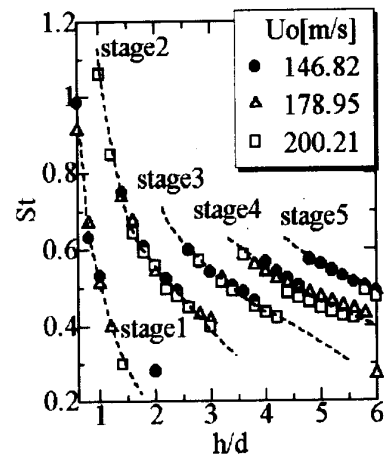


図7 ストローハル数 1

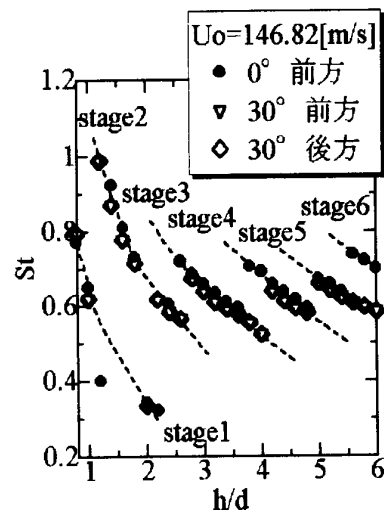


図8 ストローハル数 2

離が増加すると周波数は低い方へ移動する傾向がある。図5、6は共にオリフィスの傾斜角  $30^\circ$  のオリフィス板 (以下、 $30^\circ$ ) を使用し、マイクの位置は前方に置いて測定を行ったものであるが、マイクの位置を後方にした場合と、オリフィスの傾斜角  $0^\circ$  のオリフィス板(以下、 $0^\circ$ )を用いた場合でも、また  $h$ 、 $U_0$  を変化させた場合も同様の傾向がみられた。

図7、8は、最大ピーク周波数  $f_m$  とノズル代表長さ (ノズル口径) の積を  $U_0$  で除した無次元周波数であるストローハル数  $St$  とノズルオリフィス板距離の関係を示す。図7は  $30^\circ$  の前方において測定した結果を示す。これによると各  $U_0$  の  $St$  値は5つの曲線のグループにまとめられ、 $X/d=1.5\sim 2.5$ 、と  $3.5\sim 4.5$  付近でステージ変化が起きていることがわかる。図8は  $U_0 = 146.82$  [m/s]で  $0^\circ$  の前方と  $30^\circ$  の前方、後方において測定した結果を示す。これによると  $30^\circ$  の前方、後方における  $St$  値はほとんど変化はなく、ステージ変化も同じである。しかし、 $0^\circ$  による結果は  $30^\circ$  と比較すると全体的に  $St$  値が高く、またステージ変化に対する  $X/d$  の間隔が小さく、ステージ6まで現れている。これは  $0^\circ$  が  $30^\circ$  より周波数が高く、ステージ変化も起こりやすいことを示している。

図9は  $0^\circ$ 、 $30^\circ$  のそれぞれ前方、後方における  $Po/Pa$  に対するオーバーオール値の変化を  $h/d=1$ 、 $2$  の条件で得られた結果である。これによると、全体的にオーバーオール値は  $0^\circ$  の方が高いが、 $0^\circ$ 、 $30^\circ$  共に似かよった変動をしている。また前方、後方による測定の比較をすると、 $h/d=1$  のときに明らかに大きな差が生じることがわかる。 $30^\circ$  の場合、 $Po/Pa=1.38$  までは後方のオーバーオール値が高いが、 $Po/Pa=1.38$  を境に後方の値は急激に下がり、前方の方が高くなっている。この値の差は  $h/d=2$  の場合少ないが、前方、後方ではオーバーオール値に違いがあるといえる。

図10、12は  $30^\circ$ 、 $h/d=1$  でそれぞれ  $Po/Pa=1.16$ 、 $Po/Pa=1.46$  のときのスペクトルを前方、後方で比較したものである。図10によると  $Po/Pa=1.16$  では、後方の場合  $f_1$  の SPL (119.4dB) が前方の SPL (104.6dB) より高く、高調波成分にもピークが多く現れているのに対して、前方の場合  $f_1$  の SPL が低いため高調波成分のピークは  $f_3$  以降、なくなっている。また、図12によると  $Po/Pa=1.46$  では、逆に前方における  $f_1$  の SPL (119.2dB) が後方における  $f_1$  の SPL (102.8dB) より高くなっている。

以上、オーバーオール値とピーク SPL による前方、後方の比較により、オリフィス板の前方、後方に伝播

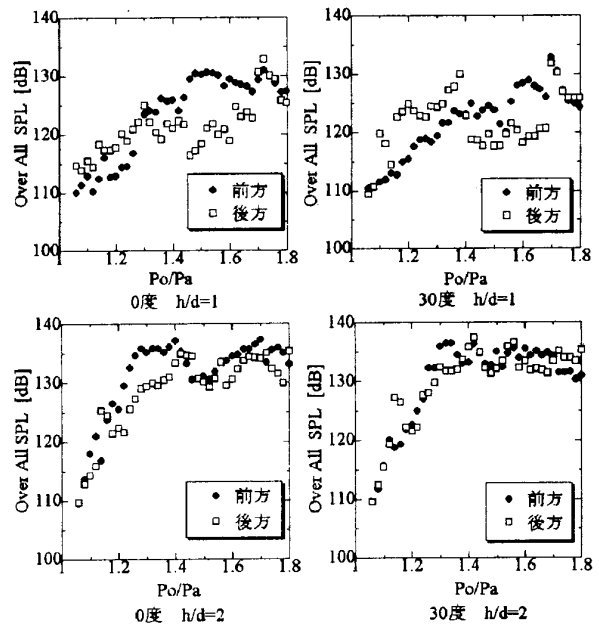


図9 オーバーオール値の前後比較

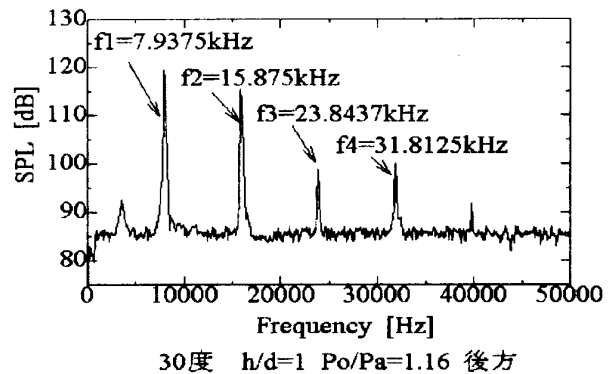
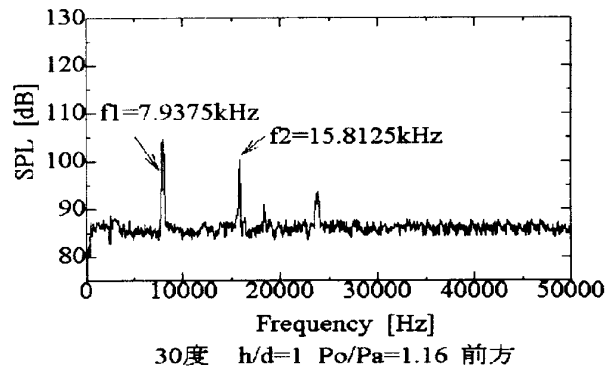


図10 スペクトルの前後比較

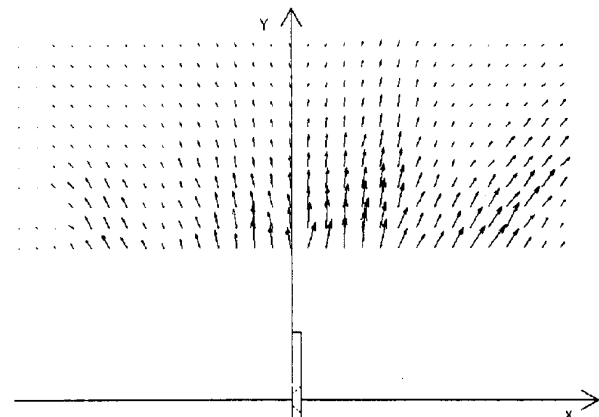


図11  $f_{1c}=8$ kHzにおけるS.I. 分布

する音には強弱の違いがあると考えられる。しかし、これらの音圧測定は図 3 に示すように  $X/d=-25$ 、 $Y/d=25$  と  $X/d=25$ 、 $Y/d=25$  において測定したもので音の伝播領域に対して測定点としては少なすぎる。そこで、図 11、13 に図 10、12 とそれぞれ同じ条件での  $f_{lc}=8\text{kHz}$ 、 $f_{lc}=10\text{kHz}$  における S. I. 分布を示す。これによると  $h/d=1$ 、 $Po/Pa=1.16$  における  $f_{lc}=8\text{kHz}$  の S. I. 分布は前方より後方に強い音の伝播があることを示している。逆に、 $h/d=1$ 、 $Po/Pa=1.46$  における  $f_{lc}=10\text{kHz}$  の S. I. 分布は後方より前方に音の伝播が強くなっている。また、それぞれの S. I. 分布は前方、後方それぞれにも伝播の強い領域と弱い領域があることを示しており、その強い領域を山とすると  $f_{lc}=8\text{kHz}$  の山と山の間隔は  $f_{lc}=10\text{kHz}$  のそれよりも広がっている。これは、S. I. 分布がホールトーンの伝播速度（音速）と周波数によって決まる定在波に対応しているのではないかと考えられる。

図 14 はこれまでのオリフィス板の前方、後方へ伝播する音の強さの違いを見てきた  $30^\circ$ 、 $h/d=1$  における  $Po/Pa$  に対する最大ピーク周波数の変動を示している。これによると、図 8 で示したように前方、後方での周波数特性は変わらない。図の点 A と点 C はそれぞれの点の前後におけるスペクトルに大きな変化はなく、最大となるピークが  $f_1$  から  $f_2$  に移ることを示している。注目すべきは図の点 B における周波数の変動であり、各  $Po/Pa$  におけるスペクトルのピークはこの点でそれまでより大きく高調波成分へ移行する。各  $Po/Pa$  におけるスペクトルの前方、後方の比較をすると、この点 B を境に前方、後方へ伝播する音の強さが逆になることがわかる。つまり、 $Po/Pa=1.16$  では後方に強い音の伝播があり、 $Po/Pa=1.46$  では前方に強い音の伝播があったが、この変化は  $Po/Pa$  が増加することによる周波数の変動が原因であることがわかった。

## 5 結言

出口口径 10mm、先細角  $30^\circ$  の先細ノズルから噴流を流し、傾斜角  $0^\circ$  と  $30^\circ$  のオリフィス板から発するホールトーンについて次のことがわかった。

- $0^\circ$  から発するホールトーンはピーク周波数とオーバーオール値が  $30^\circ$  より高く、ステージ変化も激しい。
- ホールトーンの伝播は S. I. 測定結果により、周波数別の定在波に対応した分布になることがわかった。
- S. I. 測定結果により前方、後方へ伝播する音の強さに違いがあることがわかり、その強弱の変化は周波数の変動を境にして起こる現象である。

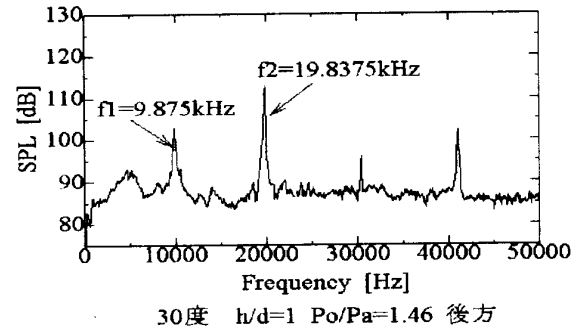
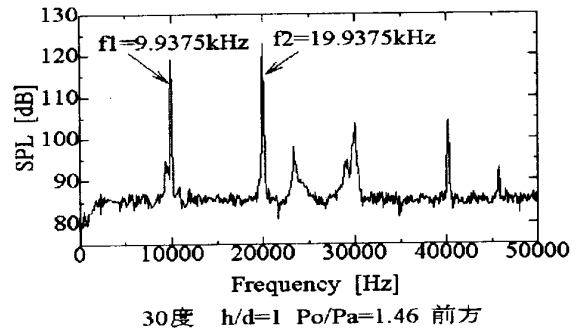


図 12 スペクトルの前後比較 2

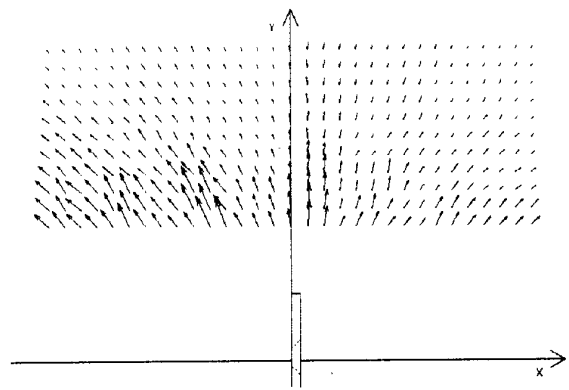


図 13  $f_{lc}=10\text{kHz}$  における S. I. 分布

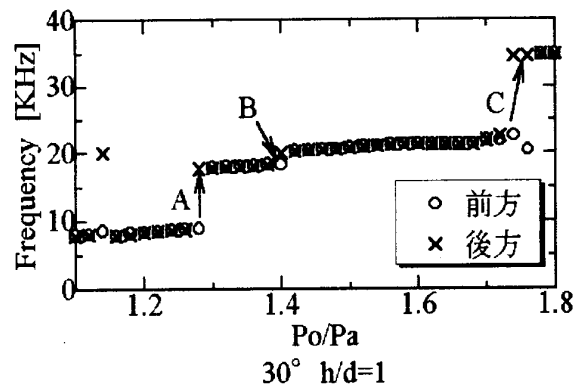


図 14 圧力比に対する最大ピーク周波数の変動  
参考文献

- (1) Y. Umeda and R. Ishi "Hole tone generation from highly choked jets" J. Acoust. Soc. Am. 94 (2), Pt. 1, 1993.8
- (2) Dong-Hoon Lee "An Experimental Study on the Frequency Characteristics of Hole tones Generated by a Circular jet of Low Speed Impinging on a Plate with a Round Hole" J. Korean Soc. 1997.6