

## 2次元剪断層と平板の干渉による発振と空力音

坂 尾 富士彦\*

### Aerodynamic Sound due to Interaction between a Two-Dimensional Free Shear Layer and the Leading Edge of a Parallel Flat Plate

by

Fujihiko SAKAO

*School of Engineering, Hiroshima University*

#### ABSTRACT

Sound is generated aerodynamically when the leading edge of a flat plate is set in the middle of a free shear layer. The mechanism for it is a self-maintaining oscillation based on a feedback loop including perturbation of the shear layer by sound at the nozzle lip, developments of the perturbation downstream, and sound generation at the edge by passing of the perturbed vorticity. Due to absence of acoustic resonance in the present set up, any change in parameters results in smooth, continuous and wide-ranged changes in the outcome, unlike in previous experiments, where changes are often sticky, discontinuous, and with hysteresis. It seems that there are more than two different mechanisms, and either of them appears according to the conditions. Among the conditions, whether the shear layer from the nozzle to the edge is laminar or turbulent is very important.

**Keywords:** shear layer, laminar vs. turbulent, aerodynamic sound, self-maintained oscillation sound by edge

#### 1. ま え が き

2次元噴流中にくさび状の物体を置くと出るエッジトーン、軸対称噴流中に垂直に円筒状物体を置いた時に発生する音などの研究は数多く行われて来た。軸対称の噴流と円筒の組み合わせは特に多い(文献1)。いずれもフィードバックによる自励振動現象である(と著者は信じる)が、その事自体及び音の出る機構について色々議論がある。エッジトーンについて「フィードバック説の根拠をさらに明確に……した」事がそれ程古くはない

研究(文献2)の結論の一つであり、更に後の論文(文献3)でも一応「フィードバック説が有効」と認めつつも「いまだに定見が確立されたとはいいがたい」としている。また、振動片のない笛の音については歌口へ入る流量の変動に基づく理論が多い(文献4)。それは誤りとは言えない迄も最適とは思えない。著者は、笛の歌口を太い(内部に流速一様即ち渦度0の部分がある)噴流の、端の剪断層に当たった時にのみ鳴る事を実験で確かめた経験があり、流量よりも渦度で表現すべきだと主張したい。

線スペクトルを含む音の出る現象について、上

\* 広島大学工学部

流に由来する境界層内攪乱の選択的増幅や、前後2つのエッジからの音の干渉に線スペクトルの原因を求め、フィードバックは認めない考え方もある(又は最近迄、あった)。フィードバックによる発振を認める立場にも色々ある。今年発表された笛の音についての某大家の解説でも、エッジトーンで生じた周期的な渦が歌口に当たって種々な周波数の音を出し、その中から管の共鳴によって特定周波数が強調されると理解しているようである。実際には後述のように、管の共鳴によって歌口に向かう流れの変動自体が全く変わってしまい、共鳴するような周波数の速度(渦度)変動のみが大きくなるのである。本研究(の途中経過)を、あるシンポジウムで発表した際に「ノズル下流の渦の発達は判っておらず、従って、出る音も判る筈で、この研究の意味が判らない」と指摘された事もあり、一般の認識不足を示している。著者の見解では、笛・剪断層とエッジ等の音は、渦度の変動、音の発生、若しあれば管の共鳴、の全部を含む帰還ループによる発振がその発生機構であり、その一部分だけで短絡するエッジトーンによるものとか、上流から与えられた成分から選択するものではない。

著者は暫く前から、「音を含むフィードバックによる発振」と「渦度による音」の見地からの、2次元剪断層と板による音の実験を続けている(文献5~7)。それは笛の機構の基礎実験、共鳴だけ省いて他を調べる事にもなる。この場合の音は、剪断層が受容性に富むノズル出口(即ち出発点)で外乱を受け、生じた渦度変動が下流にある板の前縁と干渉して音(及び擬音波)を出し、それがノズル出口にフィードバックされて発生する自励振動による。地上の輸送機関も高速化と共に空力音が問題になっている。高速気流に曝される表面に凹みがあればこの実験と類似の状態になる。これに更に共鳴があれば笛と同じである。流体を輸送する管内でも時に笛音が出る。この実験はそれらを最も単純化したものに相当する。管の共鳴が関与しないという点ではエッジトーンその他もそうであるが、全部が渦層から成る薄い噴流全体を変化させてしまうエッジトーンとは異なり、

ここでは、厚い噴流の片側の剪断層内に薄板を平行に置くだけで、流れ場そのものには僅かな変化しかない点が異なる。以下、実験中に遭遇した興味ある事実を紹介する。

## 2. 実験装置

図1は測定部の大要である。噴流出口は2次元を目指して15mm×120mm、流速は最大40m/s。ノズルの絞り比は8:1、Bossel(文献8)の方針に従い、ゆっくり縮小して出口の境界層は層流である。上流鎮静室内には音の直進を妨げる板があり、板も含め全ての面は吸音材で覆われている。下流からノズル内部に向かう音は断面積がゆっくりと変化するノズル内を容易に遡って鎮静部内で吸収され、反射は少ない。

噴流の片側の剪断層内に薄い板の前縁を置く。板は空気力で振動しないよう厚さ0.5mmのアルミ板を折曲げて作り、前縁の曲率半径は0.5mm、後端の厚さは約3mm、横幅は噴流と同じ120mm、長さは150mmである。横幅の両端に幅120mmの亚克力樹脂板をおいて流れの2次元性を助ける。その外側には何も無い。この装置では音が反射を繰り返す共鳴が生じ難い事が特徴で、従来発表されている研究の殆んどと著しく異なる。但し、著者は別の実験で不可解な共鳴に遭遇した事もあり、

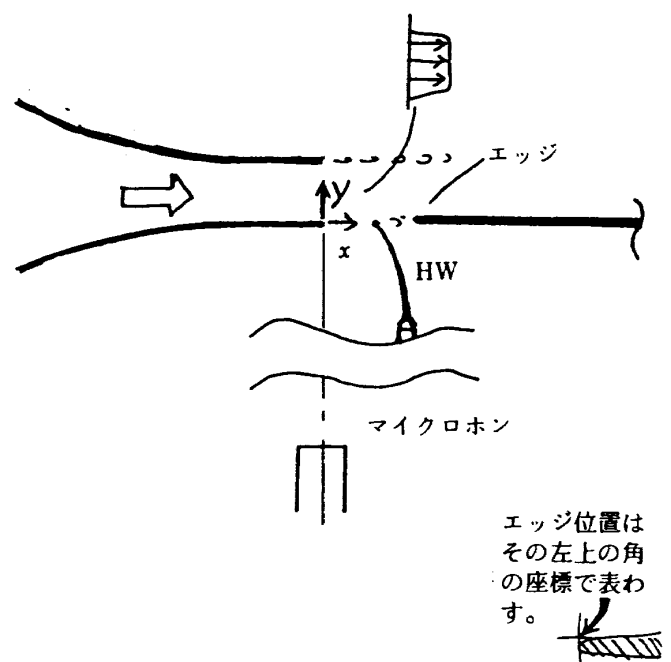


図1 測定部の構成

共鳴は絶無と断定はしない。測定部本体は無響室内にある。音を観測するマイクロホンは噴流の手前側の縁から28cmの位置に固定してある。

### 3. 測定結果と考察

下流の板（流れに平行；但し角度は大して影響しない）の前縁が剪断層内にあれば音が出る。噴流の内部にあると音は非常に小さく、音色も全く異なる。以下に示す結果は前縁の中心が剪断層のほぼ中心にある時のものである。この時、音は最大に近い（前縁の位置と音のレベルの関係は文献5参照）。なお、剪断層が最初から乱流であると全体の音も小さく、成分中の発振らしいものも無いか、小さい。

図2は音のパワースペクトルの代表的な例を示す。純音ではなく多数の、それも大差無いレベルのピークから成る上、夫々のピークの幅も広い。すべて、共鳴が無い為であろう。各ピークの幅はほぼ同じで周波数も必ずしも整数比ではないから、これらは一つの発振の基本波と高調波ではなく、互いに独立な発振が共存すると見られる。多数のピークは、その中の一つだけが重要で他は取るに足らないと見る事はできない、即ち、従来の研究で一般的に行われた、ただ一つの「卓越周波数」について議論する事は今の場合には全く不適當である。これも共鳴が無い事の結果であろう。

図2の中で、(a)から(f)迄は同じ風速（動圧10 mmAq）でエッジ位置を下流に移動させた系列であり、(e)、再び(b)、そして(f)、(g)、(h)はエッジを固定して風速を増加させた系列である。参考の為、ノズル内部にトリップワイヤを置いて境界層を乱流にした場合のスペクトルの例をも示してある。即ち、出口で層流であれば(i)のようになる場合、境界層を乱流にすると(j)、(k)のようになる。(j)はノズル出口近くに径1.5mmのトリップワイヤを壁面に密着させた場合、(k)はそれを上流の流速が低い部分に置いた場合である。(j)の方では発振らしい特徴がほぼ完全に失われているけれども、やや発振らしい特徴の残っている(k)の方が、音のレベル自体は却って低い（なお、(i)–(k)のみ、横軸の範囲が0–10kHzと他より広い）。

図3は一部のデータについて流速と各ピークの中心周波数の関係を示す。周波数は、ほぼ流速に比例して連続的に増加し、笛や、軸対称噴流と同軸円管の組合せで報告される階段状の跳躍現象は無い。この実験では周波数を固定する共鳴がないからである。周波数は板とノズルの距離には反比例に近い。連続的に変化する事は同じである。ヒステリシスは全く見られない。距離または流速に小さい変化を与えれば対応する小さい変化が音色とスペクトルに生じる（図3に纏めてないデータも全て同様）。ただ、広い範囲に条件が変わる場合に途中でスペクトルの較正が変わる事はあり、その途中、ある箇所で不連続的な変化が見られるが、従来発表されている結果の中に見られる周波数の跳躍現象とは全く異なる特性を示し、別の原因による事が判明している（後述）。著者は、従来の実験では、意図的に共鳴させる場合は勿論であるが、それに加えて、また、共鳴が無い筈の場合にも、音の反射を防止する十分な処置がなされなかった結果、意図しない共鳴装置があったものと考えている。例えば軸対称噴流の下流の円筒を短くした、共鳴無しの場合での実験（文献1）であっても、発生する音の主要部分の周波数は或る特定の値の近傍に固定される傾向が明らかで、どこか……恐らくはノズルの内部……に隠れた共鳴があったと想像させる。今回の実験では共鳴がない上に2次元配置の故もあってか、一巡増幅度が小さく非線形の効果も小さいので、独立な多数の発振が共存し得るものと思われる。前述のようにノズル内部の境界層を乱流にすると発振が止まるのも一巡増幅度が小さい為と思われる。なお、図3の最下の線上のデータは発振による物ではなく、噴流中の自然攪乱による、しかもエッジが無くても出る音である事が後に判明した。これは他に比べて振幅もずっと（20dB程度）小さい。

図2でも述べたが、色々な流速・距離で各ピークの周波数比を調べると、発振機構が2種類以上存在するようである。出口直後の剪断層が層流で流速も距離も小さい時、音のスペクトルは幅の狭いピークの集まりで、それらの中心周波数は整数比の系列である。図2(e)はその例であるが、別の

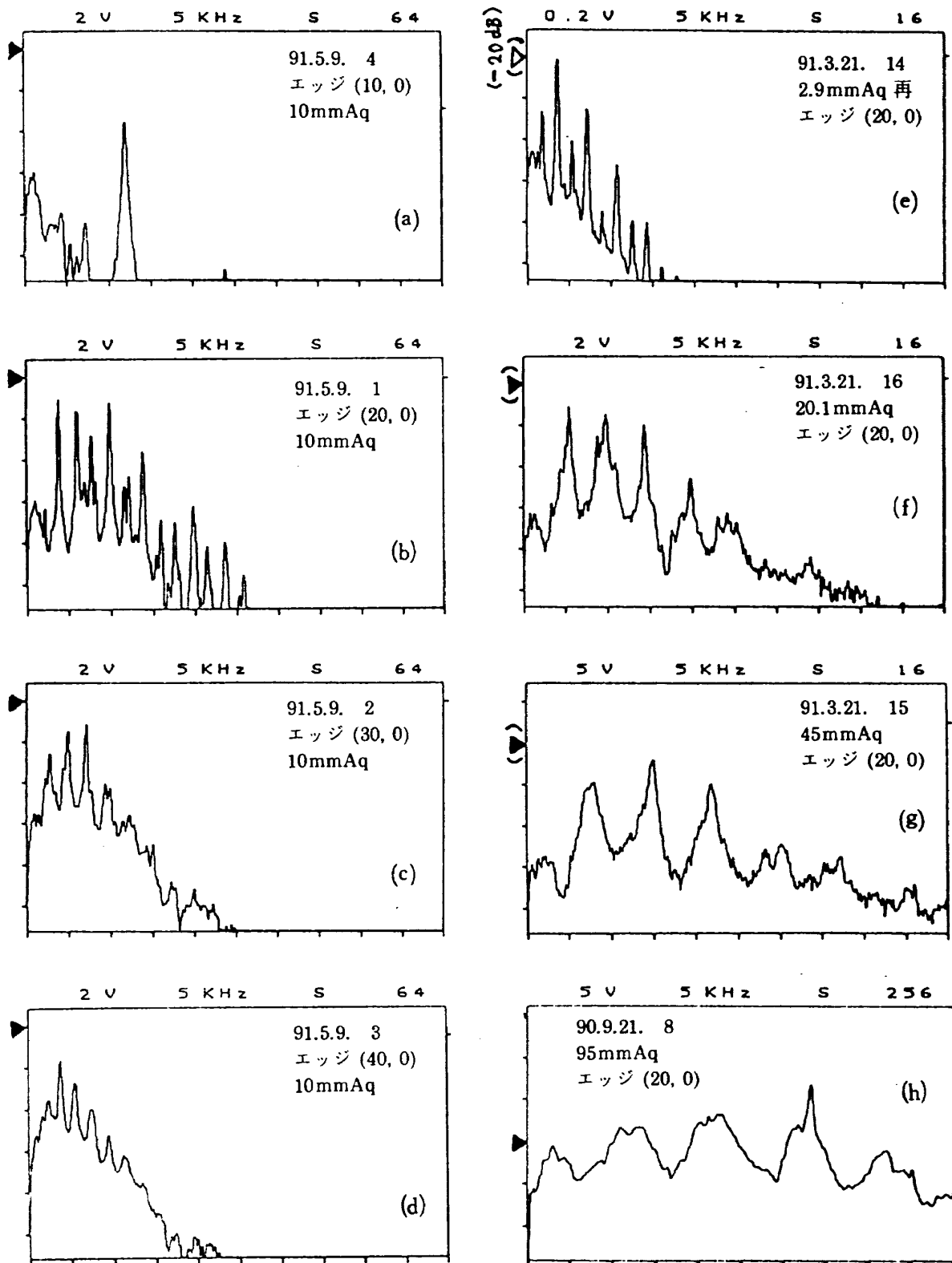


図2 音のパワースペクトルの例

マイクロホンは噴流の横28cm。横軸は周波数で0~5kHzの直線目盛、縦軸は対数目盛で10dB/div 風速は動圧 (mmAq) で表示してある。(X, Y)はエッジの位置で、エッジとノズル出口の内面が滑らかに接する位置を(0, 0)としている。

縦軸左側の黒い三角は図上での0dBの位置を示す。但し(e), (f), (g)の3つは入力系統の増幅度が異なり、他との絶対値の比較はできない。

(a)から(f)迄は同じ風速(動圧10mmAq)でエッジを下流に移動。(e), (b), (f), (g), (h)はエッジを20mmに固定して風速を増加。(i), (k)は(i)の境界層をノズル内側で乱流にした場合で、(j)は出口近くの壁面に径1.5mmのトリップワイヤを置いた場合、(k)はそれを流速の低い上流に置いた場合。(i), (j), (k)3図のみ、横軸の範囲は0~10kHz。

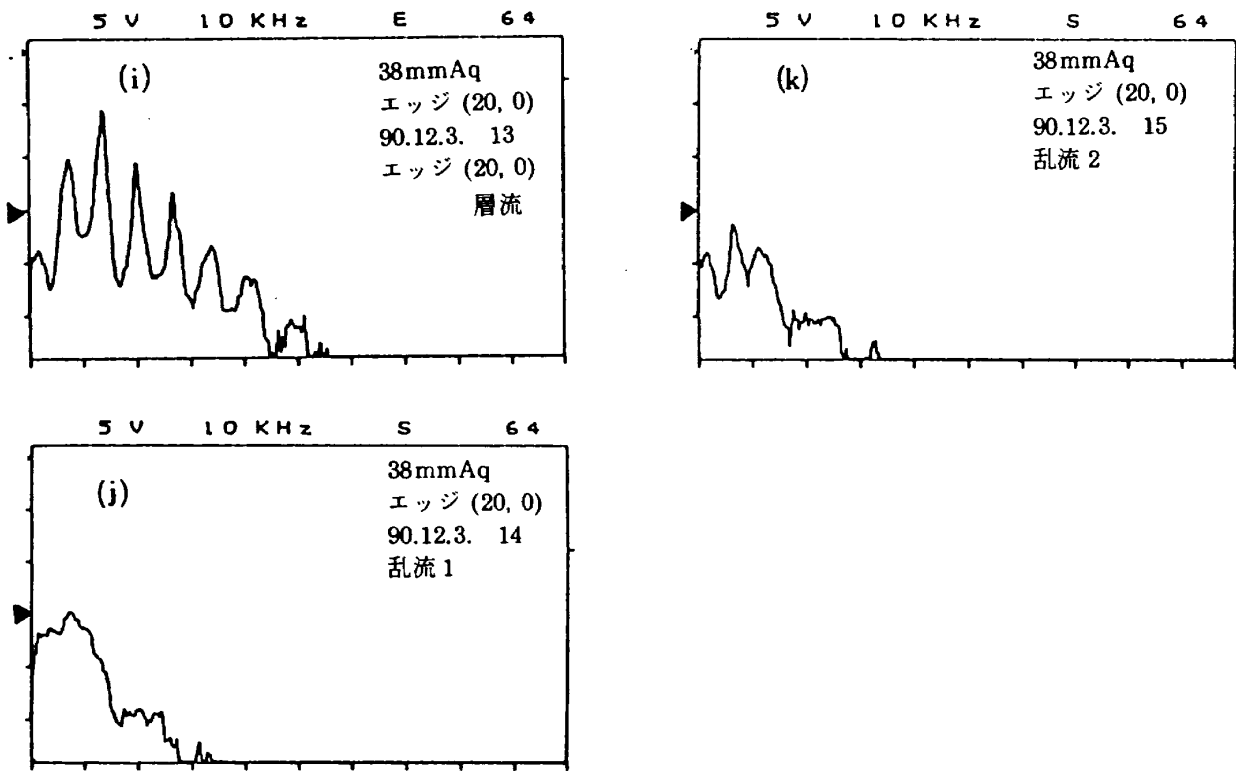


図2 続き

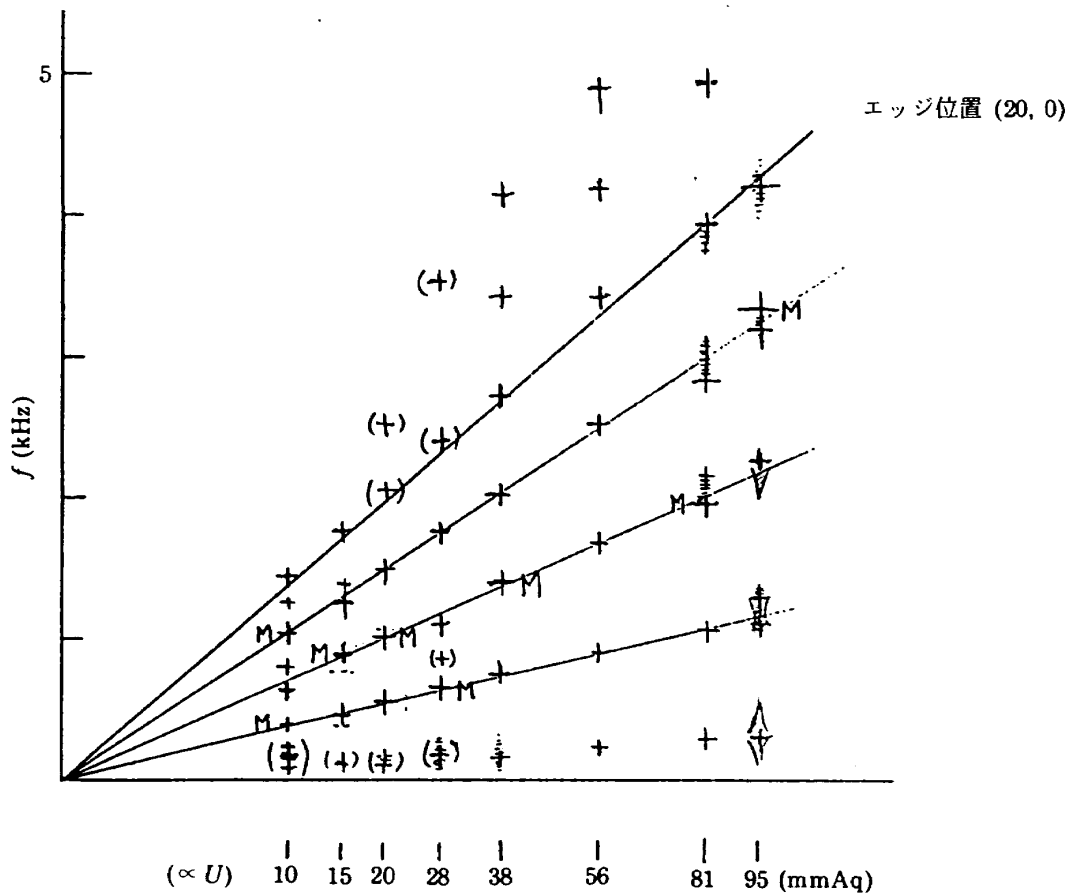


図3 流速  $U$  と主要成分の中心周波数  $f$  の関係  
(但し一部のデータについて)

例を図4(a)の上半分に示す。距離が大きかったり、流速が大きいと中心周波数が(1/4+整数)の系列に遷移し、音色も変る。スペクトルの個々のピークの幅も広くなる。図4の(b), (c)はその例であるが、図2の大部分もそうである。下流にエッジの無い図4(d)の音のスペクトルを他と比較して、最低周波数のピークらしきものはエッジと無関係に出る成分である事が判る。

図4の、各々の下半分は熱線による速度変動のスペクトルを示す。下流のエッジの有無によって上流の速度変動に大差がある事はフィードバックによる発振現象である事の明証である。

ノズル内部にトリップワイヤを置いて境界層を乱流にすると発振音は出難い(前述)が、出口では層流であった剪断層が下流のエッジに達する迄層流であるか、途中で乱流に遷移するかが、上記

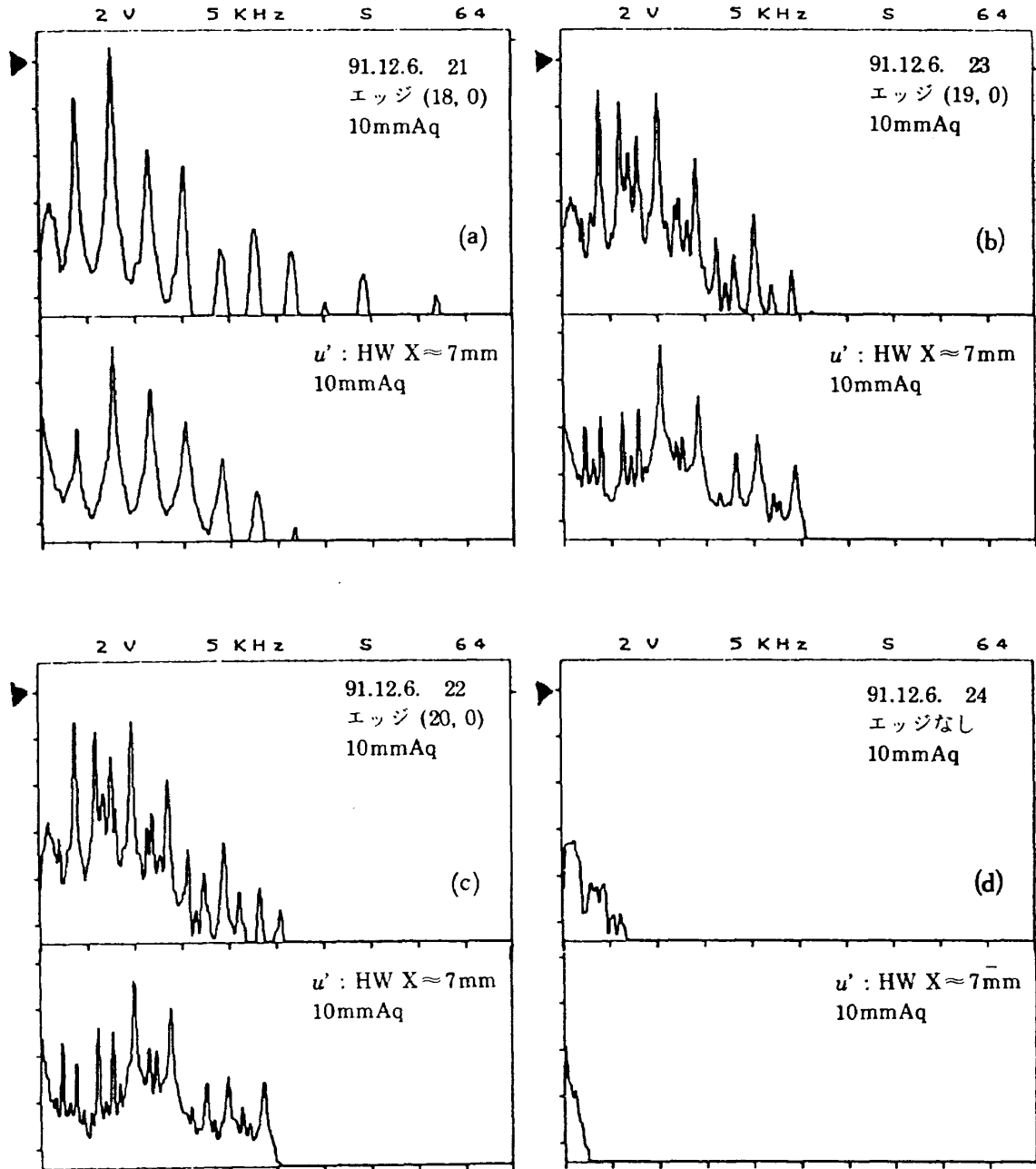


図4 音と、速度変動のスペクトルの例  
各図の上半は音、下半は速度変動。目盛その他は図2と同じ。速度変動の測定位置はノズル出口から7mm、横方向には剪断層のほぼ中央。  
(a) 剪断層が出口からエッジ迄層流で、各ピークの中心周波数は整数比の系列。  
(b), (c) 剪断層は途中で乱流に遷移。  
(d) 下流にエッジが無い場合

の2種類のスペクトルのいずれが現われるかを定めるようである。図5は細い外径(0.5mm)のピトー管で測った平均速度分布の例で、風圧10mmAqでノズル出口から18mm付近で乱流に遷移するらしい。熱線風速計による速度変動波形もそれを裏付ける。これらは下流の板の無い状態である

が、図2(e)、図4(a)と他の場合の違いに対応している(図2(a)は前の場合であるが、辛うじて発振する状態なのでスペクトル系列ははっきりしない)。剪断層の遷移に対応する音のスペクトル系列の変化については、以下、より詳細な結果を示す。

図6には板前縁とノズルの距離を変えた時の発

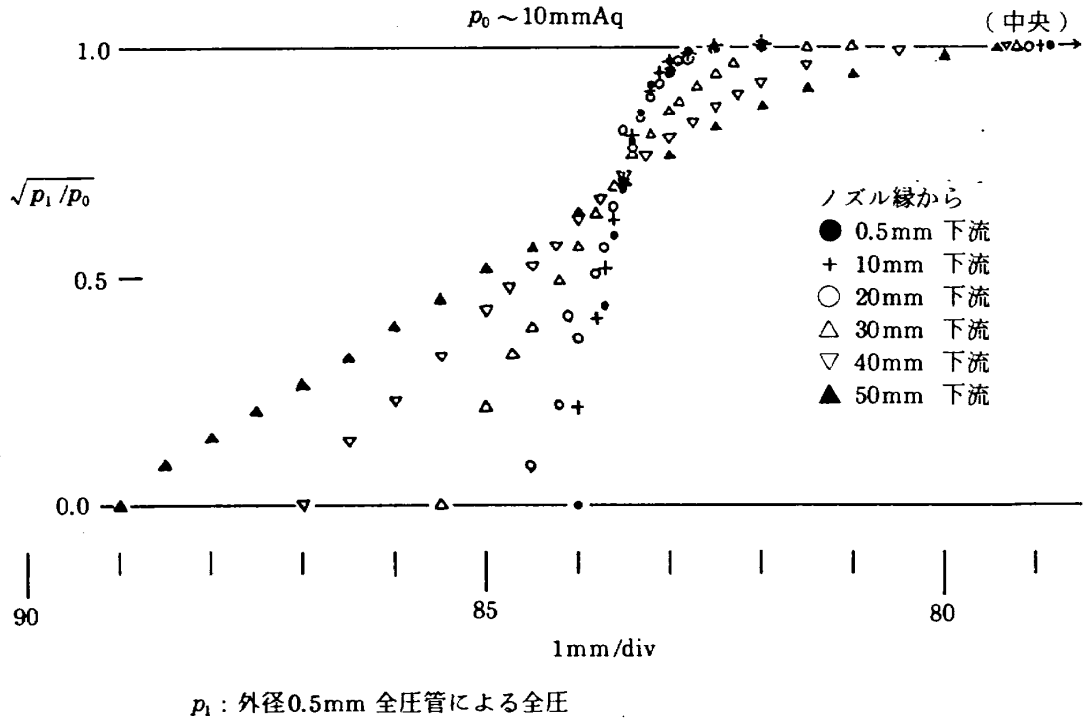


図5 平均速度分布の測定

細い(外径0.5mm)ピトー管で測った速度分布の例(板の無い時)。主流の風圧10mmAqでは20mm以内で乱流に遷移すると見られる。

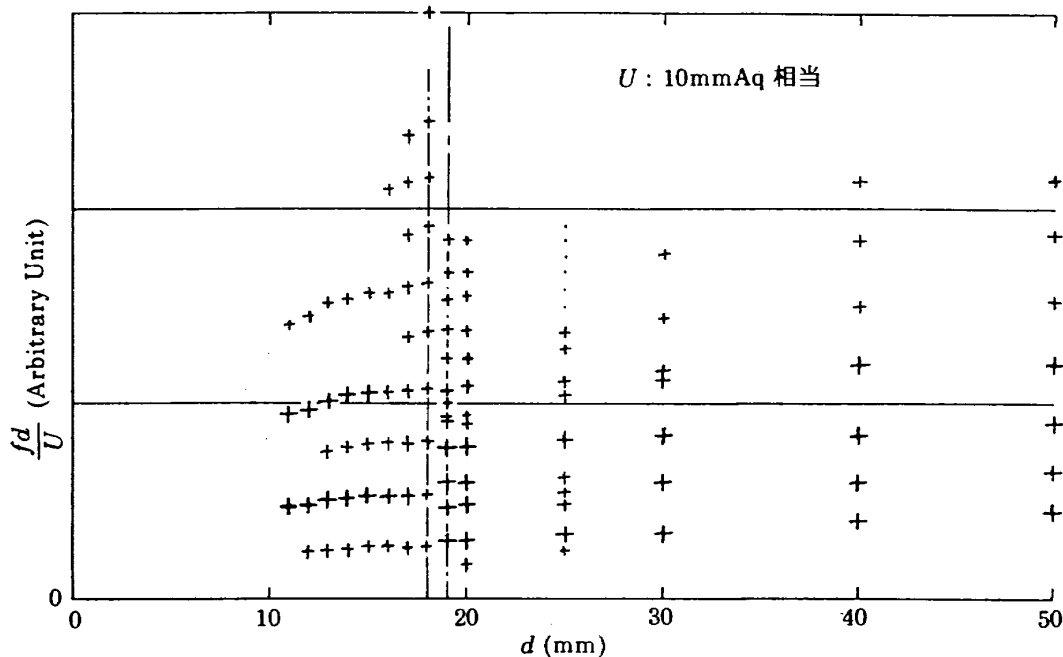


図6 距離と周波数(風速は10mmAq相当)

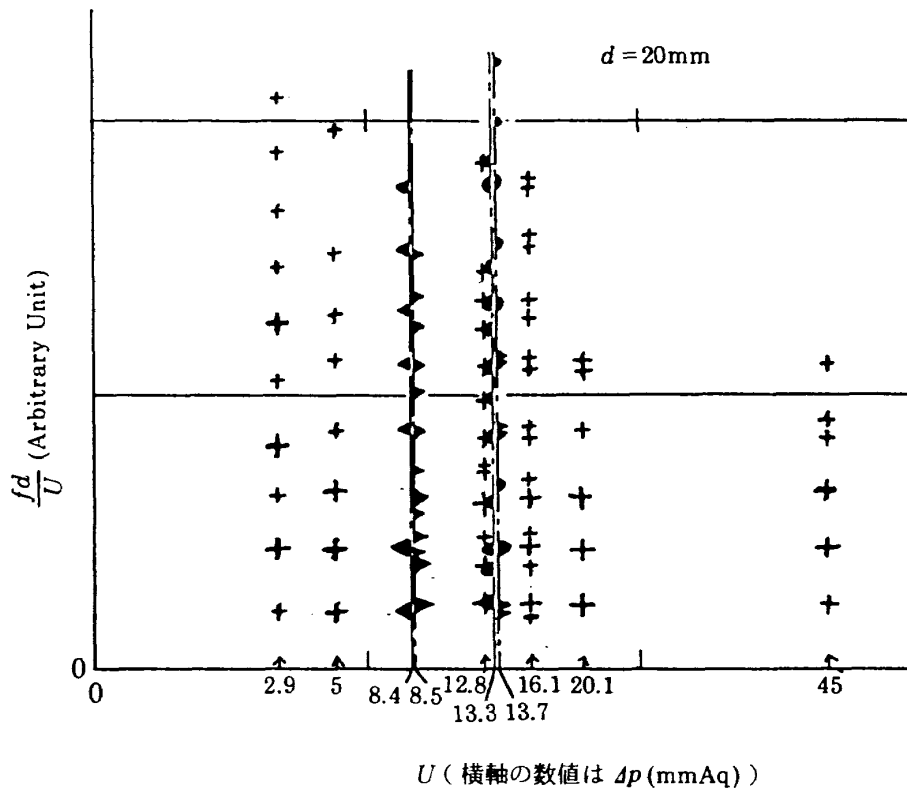


図7 風速と周波数(ノズルエッジ間距離は20mm)

振周波数の変化(の例)を示してある。データが全体としてはほぼ水平に並ぶ事から、周波数は距離にほぼ反比例する事が認められる。エッジトーンではこの点が詳しく研究されているが、ここでは省略する(矛盾はしていない)。風速が10mm Aq相当の場合、距離18mmと19mmの間で周波数成分の系列が急変する事が認められる。それは剪断層の層流・乱流遷移の位置と一致する。但しなぜそうなるかは分からない。

図7には距離を一定(20mm)にして風速を変えた場合の結果が示してある。同じように、風速の動圧が8.4mmAqと8.5mmAqの間で急変が起きる。これは図6の急変に対応する変化である。図7では更に、13.3mmAqと13.7mmAqの間にも変化があり、それ以後風速の増加と共に更に変化しつつ、層流(左端)の場合と似た状態に落ち着くように見える。この事を念頭において図6を見れば、距離20mmと25mmの間に第二の変化があるのかも知れないと思われる。これら、第二以下の変化は、理由は勿論、何に関連するかも全く不明であって、今後研究する予定である。

#### 参考文献

- 1) 倉沢, 小幡, 平田, 笠木: 軸対称剪断層の衝突に伴う自励振動現象, 機械学会論文集 B-53 (1987) 1254-1261 (No.488) 及びその引用文献参照.
- 2) 米持, 前田: エッジトーン発振現象, 計測自動制御学会論文集 4 (1968) 389-396 (No.4).
- 3) 林, 宮本, 藤原, 伊藤: エッジトーンに関する実験的研究, 計測自動制御学会論文集 16 (1980) 892-897 (No.6).
- 4) 吉川: パイプオルガンの音響学, 音響学会誌, 47 (1991) 834-843 (No.11) その他.
- 5) 坂尾: 剪断流中の板による空力音, 航空宇宙学会西部支部講演集 (1990) 41-44.
- 6) 坂尾: 剪断流内の平板の空力音, 機械学会講演論文集 910-17B (1991) 46-47.
- 7) 坂尾: 2次元剪断層と平板の干渉による空力音, 第23回乱流シンポジウム講演論文集 (1991) 430-434.
- 8) Bossel, H. H. : Computation of axisymmetric contractions AIAA J., 7 (1969) 2017-2019.