

境界層の遷移と非定常剥離——人体模型の音を通じて

坂尾 富士彦* 佐藤 浩**

Transition and Unsteady Separation of Boundary Layers, Appearing as the Aerodynamic Sound of Human Airway Models

Fujihiko SAKAO

Faculty of Engrg., Kinki Univ. Higashiroshima

Hiroshi SATO

Institute of Flow Research, Akasaka, Tokyo

ABSTRACT

Sound generated aerodynamically by obstacles in a duct is observed outside the soft duct wall, in simulation of diagnosing obstacle in human body through sound. For obstacle with convex surface the sound is due mainly to unsteady swinging of separation point of the flow over the convex surface. The oncoming flow is quasy-uniform or jet-like, simulating exhalation and inhalation phase, respectively. In the latter case, the dependence of sound increment on the flow parameters is complicated, often with unexpected features. These behavior may be explained if:

- (1) There is unsteady flow-separation on the convex obstacle (and reattachment on the wall, too) to give the dominant sound, and
- (2) The unsteady behavior is rather critically dependent on disturbances in the oncoming flow, as established previously by one of the authors (FS).

まえがき

診断の道具としての聴診器の歴史は古い。今も馴染み深い器具であるが、飾り物に近い面もある。しかし、聴診器で音を聞く診断法は対象者に何んらの苦痛も恐怖も与えない、典型的な無侵襲診断法であり、少しでも情報が得られるならば大変有益である。ある医師からの相談をきっかけとして、我々はその基礎研究を行なっている。

ヒトの呼吸器系は色々な機構で音を出す。ここでは空気の力学的な音、即ち比較的大きい断面の気管等の中に障害物がある為に、呼吸に伴って発生する音を対象にする(臨床的には、色々な原因での狭搾により音が発生する事が知られている)。空力音の研究は既に多いが、それは直接開けた場所に出る音か、管内を軸方向に伝わる音に就いてで

あった。機械や設備で普通に見られる管は壁が硬く、内部の音は壁を透して外へは出ない(例:伝声管)。管内を軸方向に伝わる音は、発生した音自体とはかなり異なる事が多い。

ヒトの呼吸器系のように管壁が軟かければ、内部の音を開口ではなく管壁を透して外部で観測できる。ここで報告するのは、流路内の障害物の存在によって発生し、柔らかい管壁を透して外部で観測される空力音について実験した結果である。

実験装置

図1は流路の模式図である。内側断面は正方形、壁の3面は厚さ10mmの亚克力板、1面は面密度0.01-0.02g/cm²の紙製で、その外側20mmに置いた12mmのコンデンサマイクロホンで音を観測する。従って遠距離音場とは言えないが、それを承知しておけば何も差し支えはなく、聴診の実状にはより近い。出力の処理は1/3オクターブバン

* 近畿大学工学部

** ながれ研究集団

ド・パワースペクトルが主である。

測定部流路（及びその直前の鎮静室）は無響室内にあり、送風機は室外にある。送風機内部にも、流路の途中にも音を遮る工夫をしてある。流速は上流の鎮静室内及び、流路内の所要の場所での静圧から求める。流路の入口は、鎮静室から、流れが滑らかに流入するよう整形してある。流路内の適当な場所に、断面が弓形の柱状物体を、その平面を紙の壁の反対側の壁面に密着させて、即ち円筒面がマイクロホンに向かうように設置し、障害物（のモデル）とする。障害物付近の流れは2次元に近いと思われる。

これだけでは呼気の場合のモデルになる。ヒトの気道の入り口は声帯により断面積が半分以下になっており、吸気

の際は噴流が発生し、下流の障害物は噴流、淀み領域、またはそれらの境界などの中にある。これを模擬する為に、流路入り口の直ぐ下流に、四分円の後の短い平坦部が鋭い縁で終る、ノズルの半分の形の物体を置いて声帯の模型とする。厚さは12mm（流路の60%）である。下流の障害物との相対的な配置は、流路壁の同じ面、逆の面、及び横の面などに変化させるが、後者が常に奥の壁にあるように、声帯の方を色々な位置に置く。両者が平行なら、流れは2次元に近いであろう。

実験結果 I. 普通の管流の中の障害物

図2にマイクロホン出力の、1/3オクターブ帯パワース

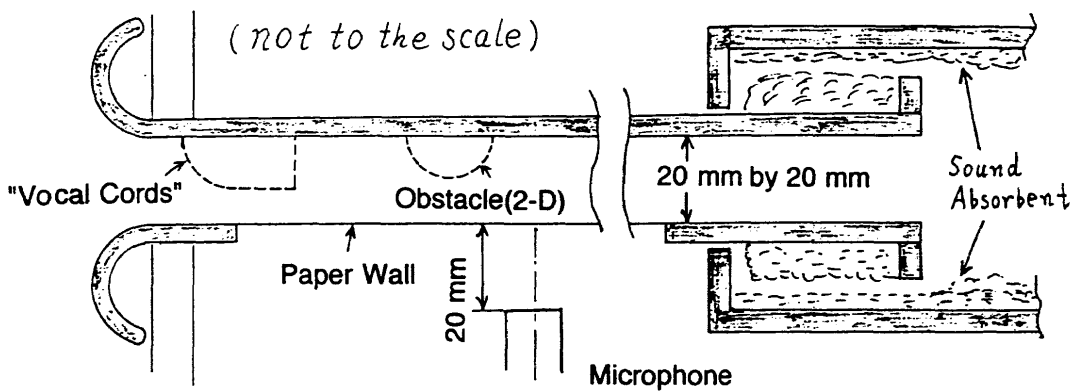


図1 流路の模式図

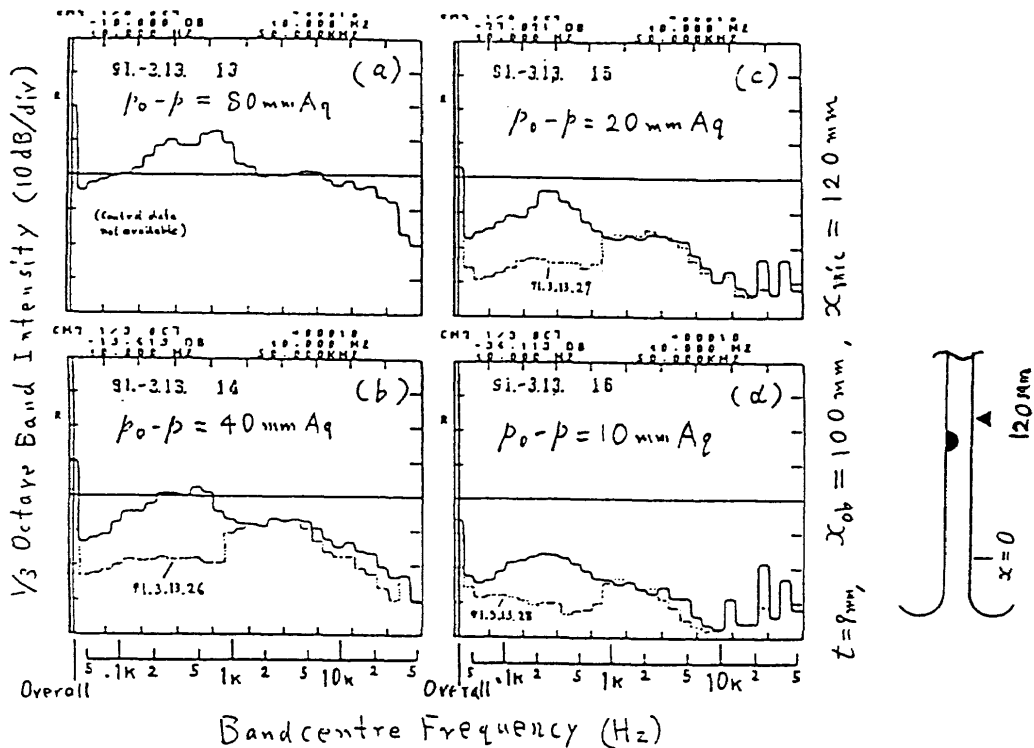


図2 マイクロホン出力の、1/3オクターブ帯スペクトル。横軸は左端は全出力、その左から、50~50,000Hzの対数目盛。縦軸は対数目盛で10dB/div、障害物の断面は主として半円。

ベクトルの例を示す。スペクトルの、概ね100Hz以上が主対象となる。実線は弓形断面の障害物(図3参照)を、その中心が流路の平行部の始まりから130mmの位置にあるように設置した場合、点線は障害物無しでの結果である。障害物の有無で流速分布は変わるが、障害物の横での流速を同じにしてある(従って流量は異なる)。 x_{ob} , x_{mic} は下流障害物の中心と、マイクロホンの位置、 t は下流障害物の厚さである。熱線風速計での測定によれば、障害物の位

置で、障害物無しではほぼ乱流、障害物があれば流れが加速されて乱れは少くなる。

図2に示すように、障害物の存在に起因する音は数百Hzの成分が主である。これ迄の空力音研究の経験から、それは滑らかな丸い障害物表面での流れの剥離点の変動による音と考えられる。図3に示すように、障害物の下流端を鋭く切断して剥離点を固定する形にすると低い帯域の音が著しく小さくなり、それが確かめられた。データは省略するが、数百Hzの音のピークレベルが流速の6乗に近い変化をするのもそれを裏付ける。

数kHzに認められる増加は噴流騒音であろう。噴流騒音は一般に流れの僅かな差異によって大きく異なり、従ってこの帯域の音のピークレベルはバラツキが大きい。

なお、図2のデータの一部では、10kHzに著しい共鳴が見られる。この共鳴は見かけ上同一条件でも現われたり消えたり不思議な振舞いをする。

測定位置の影響については、数百Hzの音は場所によってそれ程変わらないが、数kHzの音は真横では大きく、外れると急減する。なお、障害物の厚さは5mmでも9mmでも音には大差が無かった。

実験結果II. 「声門」下流の障害物

吸気時、気道入り口近くの声帯の効果を模擬する物体を流路入り口近くに置いた場合の結果を図4以下に示す。下流障害物の厚さ、声帯模型との相対位置、マイクロホンの位置などを変えてある。記号その他は図2と同様である。この場合にも、下流の障害物による音の大部分を占める数

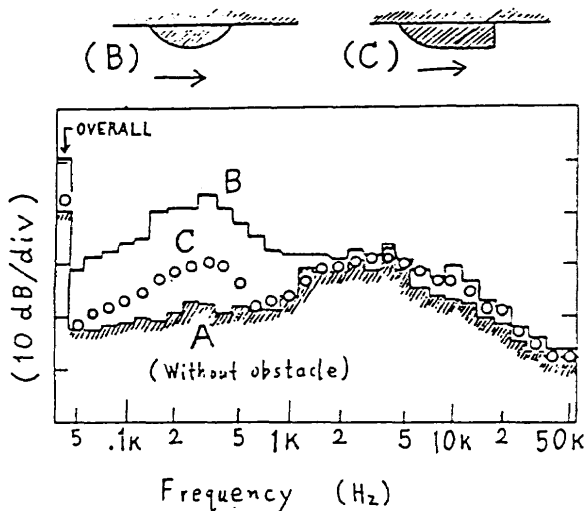


図3 障害物の有無と形状による音の差異の例
 A: 障害物無し, B: 滑らかな丸い障害物,
 C: 剥離点を固定する形の障害物
 障害物は中心が平行部の始まりから130mm
 ($x_{ob}=100mm$), 厚さ(t)=5mm, $p_0-p=40mmAq$.
 軸の目盛は図2と同じ。

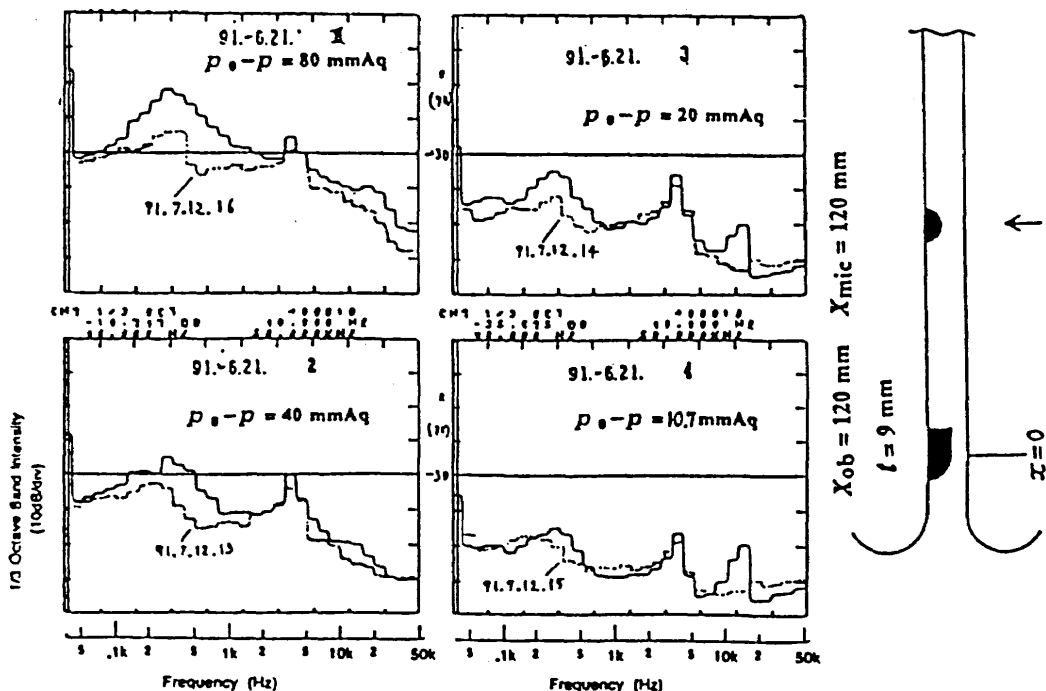


図4 厚さ9mmの障害物を淀み領域側に置いた場合

百 Hz の音は、丸い障害物表面での剝離点変動によると考えられるが、両者の相対位置により複雑な変化をする。

図4は厚さ9mmの障害物を淀み領域側に置いた場合である。障害物が比較的上流でマイクロホンも近いと(図略)音の増加は最高流速でのみ現われるが、マイクロホンを下流に離すと(図略)増加は非常に顕著になる。流れの非定常的な再付着によるのであろうか。障害物とマイクロホン

を共に下流に移すと(図示)音の増加は大きい流速で著しい。

図5は障害物が厚さ5mmの場合である。障害物が比較的上流(図略)では、淀み領域内に隠れる形であり、音の増加が少ないのは当然である。所が、障害物を下流に移した図示の場合、周波数全域に亘ってかなりの増加が見られ、厚さに比例はしない。

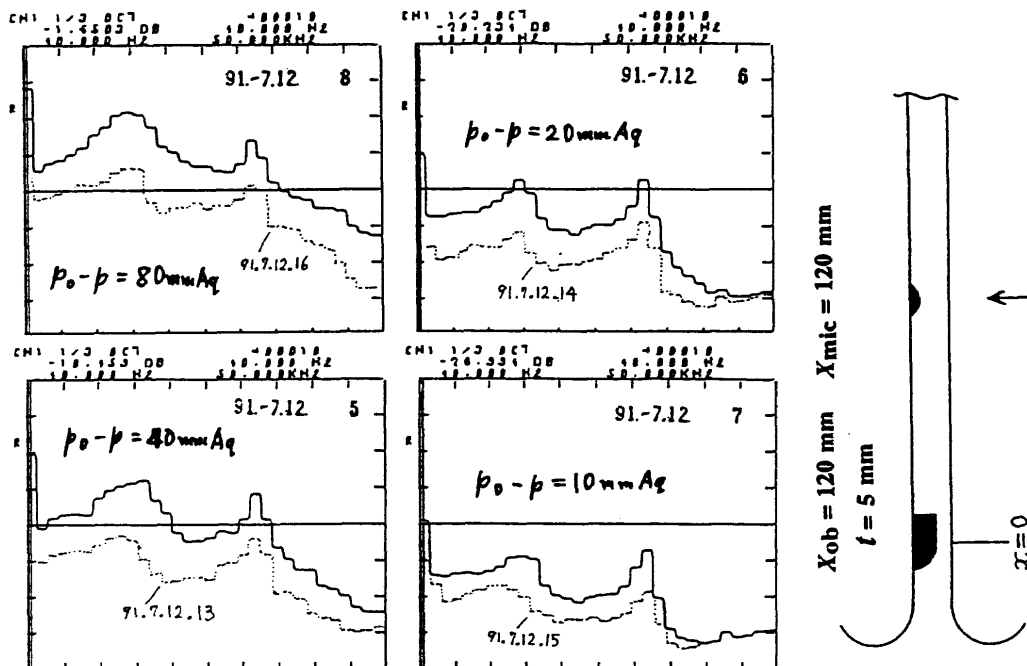


図5 厚さ5mmの障害物を淀み領域側に置いた場合

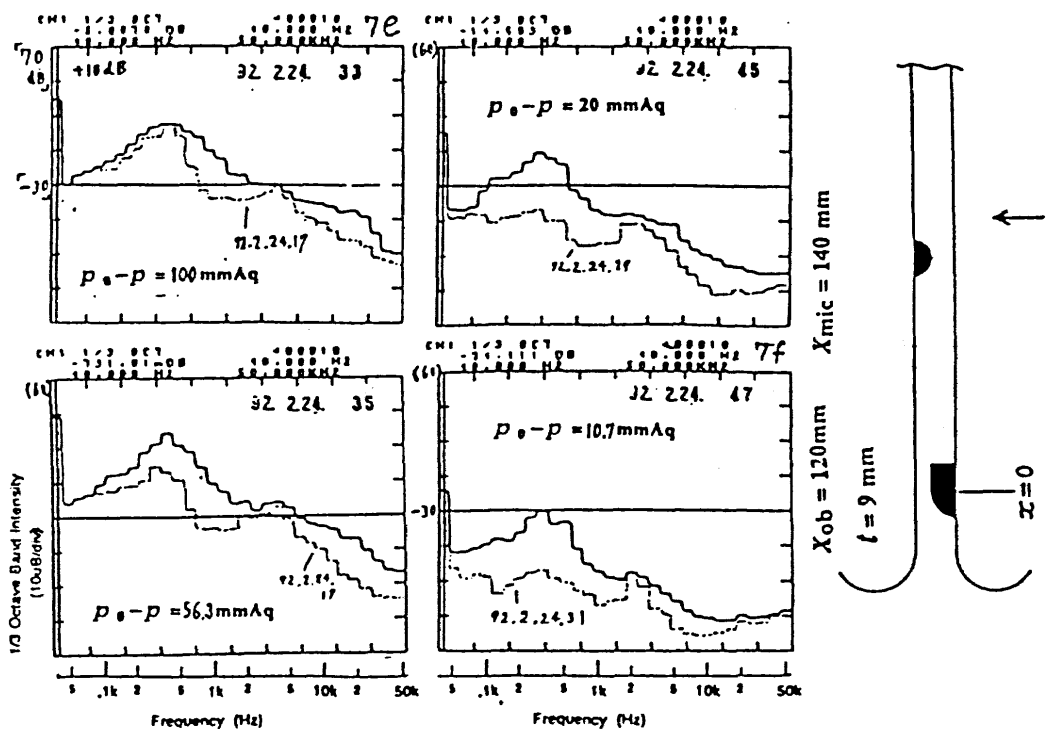


図6 噴流が衝突する側に、厚さ9mmの障害物を置いた場合

図6は噴流が衝突する側に、厚さ9mmの障害物を置いた場合である。障害物が比較的上流の場合(図略)、マイクロホンが近くでも、下流でも、かなりの音の増加が見られる(少しの定性的違いはある)。障害物がずっと下流の場合、マイクロホンは傍(図示)でも更に下流(図略)でも、音の増加は著しいが、最高流速でだけはやや少ない。大胆な推測をすれば、流速が大きいと流れの乱れが強くなって剥離などの非定常変動の割合が減少するのであろう。

紙面の関係で図は省略するが、厚さ5mmの障害物を噴流の衝突する側に置いた場合、障害物が比較的上流の場合には音の増加が少ない。下流に移すと一般に増加はさらに少なくなる。気流の乱れが発達して薄い障害物の表面では明瞭な剥離が起こらなくなったと考えられる。最も低い流速でだけは音の増加が明瞭で、乱れが十分強くないことを推測させる。声帯と障害物の軸を交差させた場合は、明確な傾向はまだ得られていない。

著者はこの場合には障害物による音の増加の大部分は、丸い障害物表面での剥離(と一部は再付着)の非定常性によると考えているが、障害物の下流側の角を鋭くして剥離点を固定する等で確かめる必要がある。剥離点の変動は、以前の実験²⁾により、流れの乱れの状態により変動の程度

及びそれによる音の大きさが非常に広い範囲に変わり得る事が確かめられている。従って上に述べた、音の(相対的な)増加が流速によって変る事、特に、低い流速で著しく大きいなどの一見意外な関係も、流速による乱れの変化の結果として説明できる可能性は十分にある。今後、流速の測定などにより確かめる必要はあるが、反面、予測は非常に困難であろう。但し診断への応用の可能性は、少なくとも測定位置によっては多くの場合に観測可能な音の増加が見られる事から、十分にあると言えるであろう。

この研究の費用の一部(特に研究連絡の費用)は本田工業(株)社長本田英行氏の援助による。記して謝意を表する。

参 照 文 献

- 1) 坂尾, 佐藤; 第23回乱流シンポジウム(ながれ10:別) 307-311 (1991)
坂尾, 佐藤, 第24回乱流シンポジウム(ながれ11:別) 270-275 (1992)
- 2) 坂尾; ながれ 3 : 51-68 (1984)
- 3) Sakao, F. ; 5th Asian Cong. Fluid Mech., Vol.1 : 1-12

