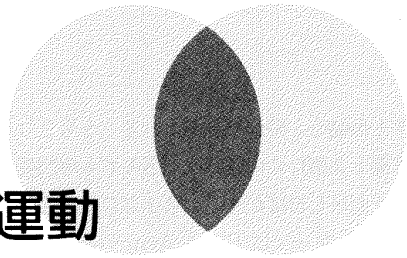


# 空力音発生機構と渦運動



東京大学理学部

助教授 神部 勉

強い風の中の電線あるいは木の枯枝などのだす音、あるいはジェット騒音などは、空気力学的な機構で音が発生するといわれる。これらの音の発生には、振動板ないしは共鳴器などは関与しておらず、空気（気体）の流れの様子が重要で、特に渦運動が本質的な役割をしていると考えられてい

る。従って発生した音を特徴づける振動数は外部から与えられたものではなく、流れの場から作られるものであり、流れの場を特徴づける速さ  $u$  および長さ  $d$  (電線の直径など) などに関係する。

その代表的な例はエオルス音 (英名はaeolian tone) に見られる。これは空気の流れの中におかれた円柱によって発生する音を指すが、古くは aeolian harp という古典弦楽器の発音機構とも関連している。長い円柱を流れの中に置くとよく知られたカルマン渦列が発生する。これは図1のような二列の周期的な渦の列で、各列の渦の回転の向きは反対で、互いに半波長だけずれた配置で生ずる。渦の周期的な発生と音の発生とが関係しているのであるが、その振動数  $f$  (1/秒) は以下のように表わされる。実験によれば、円柱の直径を  $d$  (cm)、流れの速さを  $u$  (cm/秒) とすると、 $S = f d / u$  で定義される数  $S$  は無次元となり、約0.2程度の数で、ほぼ定数であることが知られている。従って振動数は

$$f = S \frac{u}{d} \approx 0.2 \frac{u}{d}$$

と表わされる。 $S$  はストローハル数と呼ばれている。円柱の後流に渦が交互に発生するとき、円柱の表面の圧力が変動する。この変動圧力が音の発生の原因となる。この圧力変動は合力としては図に示すように、流れに直角な揚力の振動となるので、円柱は上下の振動も始めよう。しかし注意する必要があるのは、音の発生の直接の原因は円柱の振動ではなく、表面圧力の周期的変動であり、そのことは理論的にも裏づけることができる。

1950年頃、それはジェットエンジンが開発されつつあった頃であるが、ジェット騒音については、ノズル内部からくるのか、ノズル日付近の流れからくるのか、あるいはもっと下流からなのか、ほ

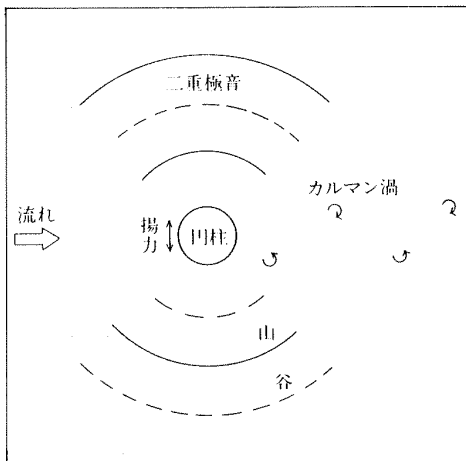


図1 カルマン渦列の発生とエオルス音

とんど何も知られていなかった(図2)。しかしジェットエンジンが大変な騒音を発生するので、将来問題となるであろうと思われていた時期であった。ちょうどその頃若い流体力学者だったJames Lighthillは、エンジンの開発の委員会のメンバーであったこともあって、新しい音の発生機構を説明する方程式に思い至った。それは現在ライトヒル方程式と呼ばれているが、一つの重要な結論は、速度 $u$ のジェットの放射する音の強さ(放射パワー)が $u^8$ に比例して増加するという8乗則である。これは低速ではかなり弱いのであるが、マッハ数 $M=u/c$ ( $c$ は音速)が約0.2を越える高速(空気中では秒速約70m)になると急に強くなる性質を示す。この法則は実験的にも早くから知られており、理論の正しさを示す代表的例として受け入れられた。その後の詳しい実験測定によると、強い騒音源はノズル口から10直径以内のジェット領域にあることが判明している。これは典型的な空力騒音といえよう。

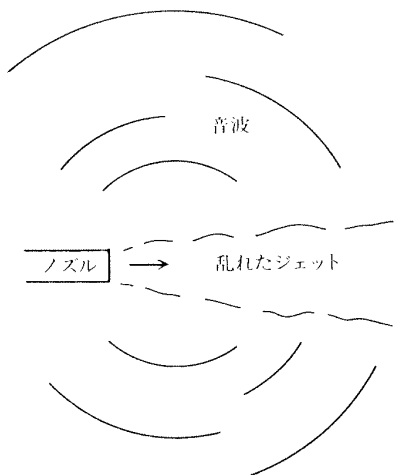


図2 ジェットと放射音

### 渦音 (Vortex sound)

渦の運動によって周囲に放射される音は特に渦音 vortex sound と呼ばれる。これも空力音の一種であることを明らかにし、その放射音の波形を実験的に検出しようというのが我々の研究の目的である。以下には、(i)すでに行なわれた研究(渦

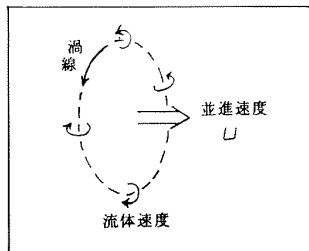


図3 渦輪

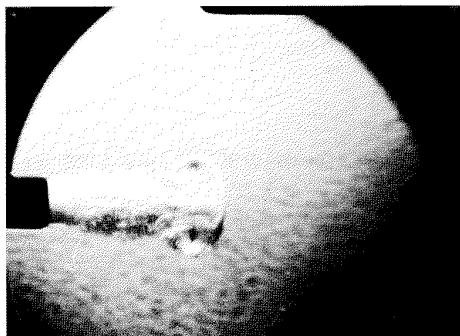


図4 シュリーレン写真(渦輪と後続のジェット)

輪の正面衝突による放射音)と、(ii)現在研究助成を受けて行なっている研究(円柱に衝突する渦輪による放射音)とについて説明したい。渦輪というのは、図3のように渦線が輪の形をし、流体がそのまわりを回転運動を行ないながら、全体として前進する渦である。これはよくタバコの煙で作る煙輪と同じものであるが、実験では秒速30mから50mの高速のものを発生させる。図4は我々の実験で使う渦輪のシュリーレン写真である。

### (i) 渦輪の正面衝突による放射音

図5は二つの渦輪の衝突運動の軌跡を破線で描いている。実験では、半径4.7mm、前進速度 $u$ が33 m/sの渦輪を正面衝突させて、中心軸 $x_3$ を含む水

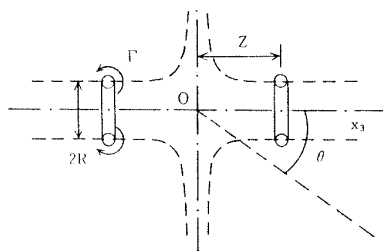


図5 二渦輪の衝突軌跡

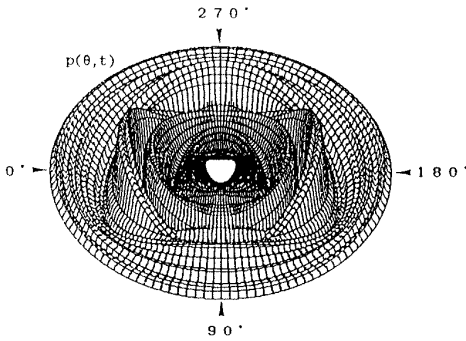


図6 観測波形(渦輪の正面衝突による放射音)

平面内で、 $x_0$ 軸からの角度 $\theta$ の方向に測定用マイクロフォンを置いて、放射音の信号を検出して解析を行なった。観測は $\theta$ の $10^\circ$ 毎に行ない、各 $\theta$ について10回の測定波形の平均を求めてから、 $\theta$ についてフーリエ級数に分解して係数を求めた。係数がわかれば、こんどは任意の $\theta$ について波形をプロットすることができる。図6はそのようにして求めた音圧信号波形の透視図である。動径座標は実は時間で、その方向で観測された波形を表わしている。外側の同心円の方が前の時間を表わす。この波形をある時刻で観測したときの音圧の方向分布が図7に示されている。白丸(正)と黒丸(負)は測定値を示し、4つの花びらのような曲線は最小自乗法で近似した曲線である。このような分布は4重極性の放射といわれ、空力音の代表的特徴の一つである。音の強度は速度 $u$ の8乗に比例することも実験的に確かめられている。

#### (ii) 円柱に衝突する渦輪による放射音

渦輪が高速で円柱に衝突するとき(図8)、どのような音波が放射されるかを観測した。この場合に放射音の成分は、等方的な単極成分、左右で正負が逆となる二重極成分、さらに四重極成分などが存在することが判明した。このような成分を求める方法は(i)のときとまったく同様で、音圧

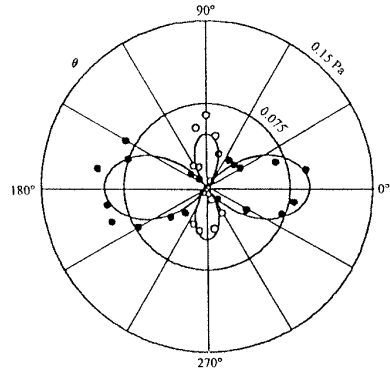


図7 ある時刻における放射音の分布(四重極分布)

信号を $10^\circ$ 毎に36ヶ所の方向で測定して平均波形を求めた。各成分の透視図を図9(1)(2)(3)に示す。同心円が同時刻を表わし、外側など早い時刻となる。ある時刻で音圧を観測したときの方向分布を図10に示す。丸(正)と+ (負)は測定値を示す。大局的に見ると二重極成分が主とみられる。二重極成分の強度は速度 $u$ の6乗に比例することは理論的にも知られているが、実験的には渦輪が円柱に衝突せずに側面を通過する場合に確認されている。

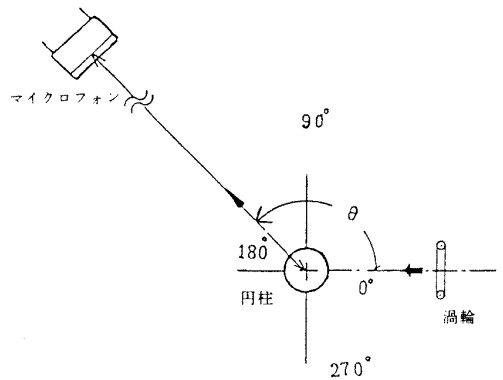


図8 円柱に衝突する渦輪

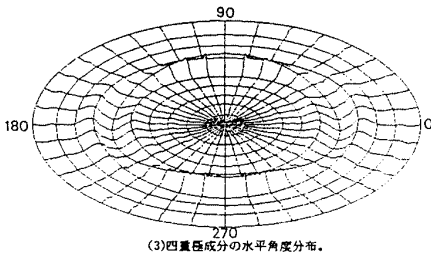
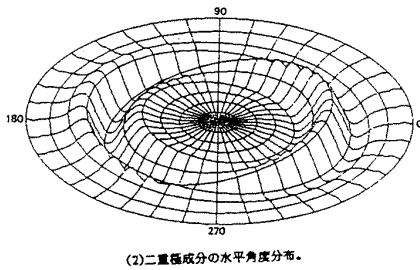
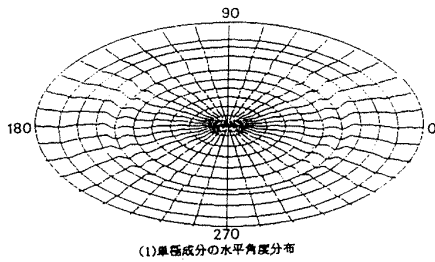
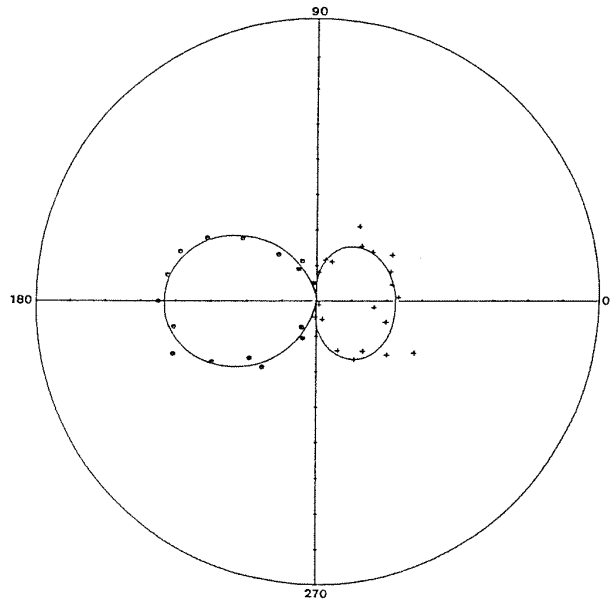


図9 測定した放射音の三成分

以上は我々の研究のほんの概略ですが、サウンド技術振興財団より研究の助成を受け、データ処理・解析および渦運動の可視化（実験中の渦は透明で見えない）の面で設備を格段に充実させることができました。その成果は本稿の図にも示されている通りです。このような研究分野は高速の車輛・自動車などの騒音対策にも関連をもつことができるかと思えます。将来、研究をさらに発展させたいと考えております。我々の研究に対し助成いただきましたことを心から感謝致します。



渦音信号の多重極性。（円柱の直径 = 9 mm、弁の開閉時間 = 1 ms、高圧ガスとの差圧 = 7 kg/cm<sup>2</sup>、測定時間 = 3.757 ms の場合。）

図10 ある時刻における放射音の分布（ほぼ二重極分布）