

〔連載〕流体力学への招待：日常生活に見られる流体现象

## 流れと音

東京大学生産技術研究所

加藤 千幸\*

## Fluid Flow and Sound

\*Chisachi Kato, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

\*E-mail for correspondence: ckato@iis.u-tokyo.ac.jp

## 1 音とは？

音は空気や水の中を波として伝播する密度や圧力の微弱な振動であり、私たちの生活と密接に係っています。波には横波と縦波があります。横波は媒質の振動する方向と波が伝播する方向とが直交している波であり、一方、縦波はその二つの方向が一致している波です。図1は空气中を伝播する音を模式的に示したのですが、空气中の窒素や酸素などの分子は、右左に微小に移動し、その結果として、分子が集まって圧力が高くなっているところと、分子が薄くなって圧力が低くなっている部分が交互に現れ、このような分子の粗密の状態が伝播していきます。圧力が高くなっているといっても、大気圧に比べればその変化はごくわずかであり、大気圧の1億分の1程度の圧力変動です。

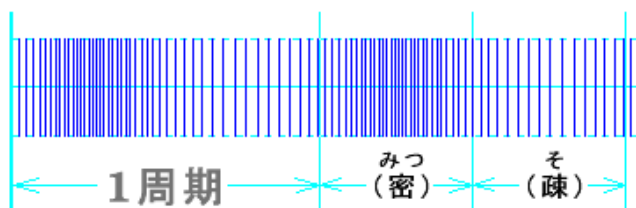


図1 空气中を伝播する音波

音が伝播する速度は音速とよばれ、常温の空気中の音速は毎秒340メートル程度です。音が伝播する速度は、音が伝わる媒質の重さと硬さで決まり、媒質が硬くて軽いほど音速は速くなり、逆に、柔らかくて重いほど音速は遅くなります。たとえば、水の中では毎秒約

1,400 m、鉄の中では毎秒約5 kmの速度で音は伝播します。

音は大きさと周波数の二つパラメータにより特徴づけられます。大きさは静かな音かうるさい音かを表す尺度であり、大きな音ほどうるさく聞こえます。周波数は低い音か高い音かを表す尺度です。音の大きさを定量的に表すために、「dB (デシベル)」という数値が用いられます。デシベルは音圧の変動(音の圧力変動の実効振幅)が、基準となる圧力変動の振幅の何倍かということを表す数値であり、基準となる変動としては、10万分の2 Pa (パスカル) という値が用いられます。Paは圧力を表す単位であり、1 Paは1 m<sup>2</sup>に1 N (ニュートン) の力が掛かっている場合の圧力に相当します。地上における大気の圧力は約10万 Paですから、音の基準となる圧力変動は大気圧の100億分の2という極めて小さな圧力変動であり、最小可聴音圧とよばれています。最小可聴音圧とはその名のとおりに、普通の人の耳で聞くことができる最も小さな音の圧力を意味しています。

音の圧力変動の振幅が最小可聴音圧と等しい時、この音の大きさを0 dBとし、その10倍の振幅の変動の音が20 dB、100倍の振幅の変動の音が40 dB、1,000倍の振幅の変動の音が60 dBと、音圧変動の大きさが一桁大きくなる毎に音の大きさは20 dBずつ大きくなります。表1に示すように、私たちが日常生活で体験する音の大きさは30 dBから110 dB程度の音です。20 dBというと非常に静かな音、50 dBは普通の音、70 dBを超えるとうるさい音、110 dBを超えると耳に異常をきたすことがあるほど大きな音です。

表1 日常生活で経験する音の大きさ

音の大きさ	30 デシベル	40 デシベル	50 デシベル	60 デシベル	70 デシベル	90 デシベル	120 デシベル
うるささ具合	非常に静かな音	静かな音	普通の音	うるさい音	かなりうるさい音	うるさくて我慢できない音	耳に異常をきたすほどうるさい音
日常生活で体験する例	深夜の郊外・ささやきあう声	図書館・深夜の市内	静かな事務所	しずかな乗用車	うるさい事務所	ブルトーカー・犬の鳴き声	ジェットエンジンの傍

さに対して、聴感上の聞こえ易さを考慮する補正をします。この補正は聴感補正といわれ、通常は、図2のA特性と記載した補正関数が用いられます。

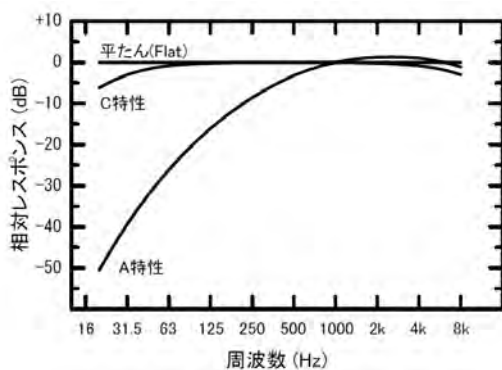


図2 聴感補正関数

周波数も音の重要な性質の一つです。周波数とは一秒間に音の圧力が変動する回数であり、単位はHz（ヘルツ）です。音が良く聞こえるかどうかは音の大きさだけではなく、音の周波数にも密接に関係します。人間の耳は20 Hz程度から2万 Hz程度の周波数の音を聞くことができ、特に、1 kHzから4 kHzの周波数の音が最も良く聞こえます。犬は、人が聞こえる音の3倍高い周波数である6万 Hzの音まで聞くことができます。さらに、イルカには15万 Hzの音まで聞こえます。人が発することができる音は高々、3 kHz程度ですが、イルカは10万 Hzの音まで発することができます。人間ドックなどで聴力検査を受ける際、通常、ヘッドホーンから二つの周波数の音が聞こえてきます。「ポー、ポー、ポー、ポー」という低い音が1 kHzの音であり、「ピッピッピッピッ」という高い音が4 kHzの音です。それぞれの周波数の音を段々と大きくしたり、小さくしたりして、どの大きさの音まで聞こえるかという検査をします。25デシベルの音が聞こえれば正常とされます。

音の大きさをデシベルという数値で表すと説明しましたが、前述のように、人の耳には良く聞こえる周波数の音とあまり聞こえない周波数の音があります。たとえば、聴感上は100 Hzの音は1000 Hzのよりも約20 dB小さく聞こえます。このため、実用上は物理的な音の大き

## 2 流れから音が発生する

音を発生させる方法にはいろいろありますが、代表的なものがスピーカーによるものです。スピーカーは電磁石によって振動板を振動させ、そのまわりの空気に振動を与え、音を発生します。実は流れの中にも音を発生するメカニズムがあります。流れの中から発生する音は流体音とよべます。流体音は水の流れからも発生しますが、実用上は空気の流れから発生する音が問題となることが多いので、空力音（くうりきおん）という言葉がしばしば用いられます。電線に風が当たるとピューッと音がしますが、あのピューッと音が典型的な空力音です。電線に風が当たると風から受ける力によって電線が振動し、その振動によって音が発生する、という理解をされている方もいるようですが、電線が振動しなくても音が発生します。では、電線が振動しなくても流れの中から音が発生するのはなぜでしょうか。犯人は流れの中の渦です。

図3<sup>1)</sup>は、円柱の周りの流れ（上図）や噴流とよばれる流れ（下図）を可視化した例ですが、流れの中には大小さまざまな大きさの渦があります。この図から容易に想像されるように、流れの中の渦は形や大きさを変えずに、一か所にじっと留まっていることはなく、絶えず変形しながら流れと一緒に流れています。渦が形や大きさを変えるためには渦に力が掛かる必要があります。渦が絶えず変形しているということは、渦には絶えず変動する力が作用していることとなります。中学校の理科の授業で、「作用と反作用の法則」という法則を勉強したと思いますが、渦がまわりの流れから変動する力を受けているということは、逆に、渦はまわりの空気に変動する力を掛けていることとなります。スピーカーの振動板はまわりの空気にプラスマイナスの向きが変わる力を掛けていますが、渦もそれが変形する際に、まわりの空気にプラスとマイナスに変動する力を作用しており、スピー

カーと同じように音を発生させます。これが流れの中から音が発生する原理的なメカニズムです。

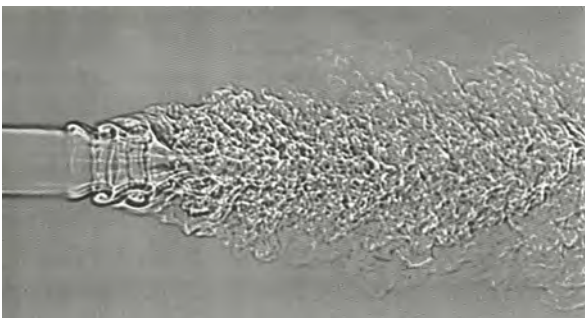


図3 流れの可視化例（上は円柱まわりの流れ，下は噴流）

水や空気の流れや流れから発生する音に関しては、その挙動を支配する基礎方程式がわかっています。ナビエ・ストークス方程式とよべます。この方程式の理論解を求めることができるのはごく限られた場合だけですが、最近では計算機の能力がだいぶ発達してきたので、元の方程式を簡略化した近似方程式の解を計算機を使って求めることができるようになりました。このような方法は計算機シミュレーション、あるいは、数値シミュレーションとよばれています。

図4は円柱のまわりの空気の流れから発生する音を計算機シミュレーションにより求めたものです。流れは図の左側から右側に流れており、この図でははっきり見えませんが、図の中央に円柱が置かれています。等高線は圧力の値を示しています。このような流れでは、円柱の背後に規則的に並んだカルマン渦とよばれる流れの構造が現れ、このカルマン渦ができる際に音が発生します。図の中央部に見える小さな模様が、カルマン渦列の圧力を示しています。一方、図全体にほぼ同芯円状に広がっている縞模様が見えますが、これが伝播する音波を示しています。この図を見ると、あたかも音が円柱から発生しているように見えますが、実際に音を発生しているのはあくまでも円柱の後ろにある、変形する渦です。このような流れでは渦から発生した音が一端、円柱の表面で反射し、そのまわりに放射されます。つまり、円柱は渦

から発生した音を集音して、大きくして放射する役割を担っています。このため、あたかも円柱から音が発生しているように見えるのです。

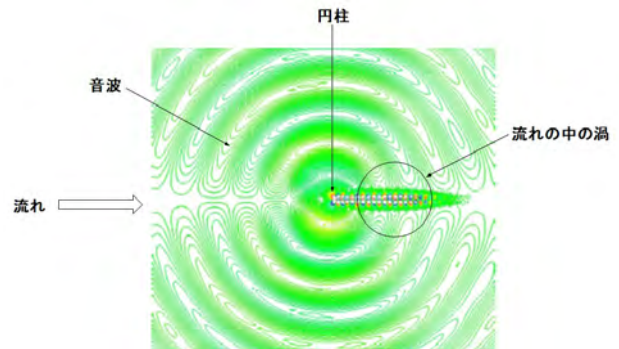


図4 円柱のまわりの流れから発生する音の数値計算結果

### 3 流れの速さが速くなると急激に大きくなる流体音

冒頭、音の性質について説明しましたが、以下では特に、流れから発生する音である流体音に固有の性質について説明します。流体音の重要な性質の一つとして、流速が速くなると急激に大きくなるという性質があります。たとえば、ジェットエンジンから発生する空力音はジェットの流速の8乗に比例して大きくなります。また、換気扇から発生する空力音は換気扇の回転数の5乗から6乗に比例して大きくなります。図5に示すように、ものが振動して発生する音は通常、機械の速さの2乗から2.5乗に比例して大きくなるので、機械の速さが速くなると流れから発生する音が圧倒的に大きくなります。東海道新幹線でひかりやこだまに乗車すると、のぞみを先に通過させるために駅で停車することがあります。のぞみが通過する際に「ゴー」というけたたましい音がすることがありますが、あの音が正に流れから発生する騒音です。また、飛行場で飛行機から直接滑走路に降り、バスに乗ることがありますが、エンジンが回転していると「キーッン」という高くて大きな音がします。あの音な

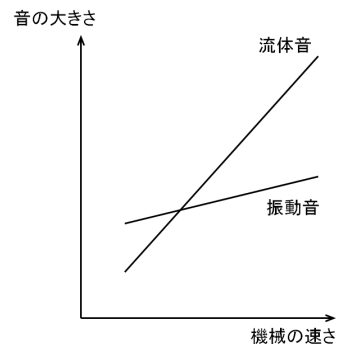


図5 機械の速さと音の大きさとの関係

ども典型的な流体力学音です。流れから発生する音が機械の速さや回転数の増大に伴い急激に大きくなるという現象は騒音という観点から重要になります。たとえば、機械の回転数を上げて性能を上げようとするとき必ず流れから発生する騒音を低減することが重要な課題となります。このため、実験や数値解析などを駆使して、何とか音が大きくならないようにいろいろな工夫がされています。

#### 4 流れと音の面白い関係

流れから発生する音は流体騒音としてその低減対策がとられる場合が多いですが、管楽器など身近なところでも起こっています。管楽器では流れから発生する音の面白い性質が使われているため、以下、これに関して説明します。

楽器から出る音と騒音の大きな違いは、騒音はいろいろな周波数の音を含んでいるのに対して、楽器から発生する音は単一の周波数の音か、倍音とよばれるその整数倍の周波数の音だけが含まれている点です。たとえば、A (ラ) の音の周波数は 440 ヘルツであり、一オクターブ高いラ音の周波数はその 2 倍の周波数である、880 ヘルツです。楽器から出る音がきれいな音に聞こえる理由は単一の周波数の音だからです。単一の周波数の音を出すために、楽器では共振や共鳴とよばれる現象が利用されています。たとえば、ギター弦から出る音の周波数は弦の固有振動数といって、弦の張力、単位長さ当たりの重さ（質量）、および弦の長さにより一つに決まります。弦を引っ張ってギターの音の高低を調整しますが、あれは張力を変化させているのです。また、指でギターの弦を抑えるのは、弦の長さを変化させて周波数、つまり、音の高さを変えています。ギターの音は弦の振動から出ますが、流体的な振動、つまり、流れから発生する音を利用した楽器もあります。リコーダー（縦笛）がその代表例です。

図 6 にリコーダーから発生する音の数値シミュレーション結果を示します<sup>2)</sup>。リコーダーでは、音から流れに対するフィードバックと音響共鳴という二つの現象が利用されています。図 6 に示すようにマウスピースから息を吹き込みます。吹き込まれる息の速さは毎秒 10 m から 30 m 程度です。吹き込まれた息（空気の流れ）はウィンドウエイという流路を通過してからジェットとなってエッジに衝突します。左側の図は流れの圧力を示し、青色のところは圧力が低いところ、ここに渦の中心があります。また、右側の図は流れの速さを白黒の濃淡で示していて、白い部分が速い流れがあるところです。

ジェットは下向きに流れながらエッジに衝突し、このとき、エッジの上側に渦が発生し、その渦から音が発生しています。発生した音はジェットの根元側にも伝播

しますが、空気の分子は音が伝播する方向に振動します。左側の図の矢印は空気の分子が振動している向きとその大きさを示しています。この図からわかるように、分子の振動によって、ジェットはさらに下向きに傾き、さらに渦が強くなり、音が強くなり、また、渦が強くなるという連鎖反応が起きます。これが流れと音とのフィードバック現象とよばれるものです。

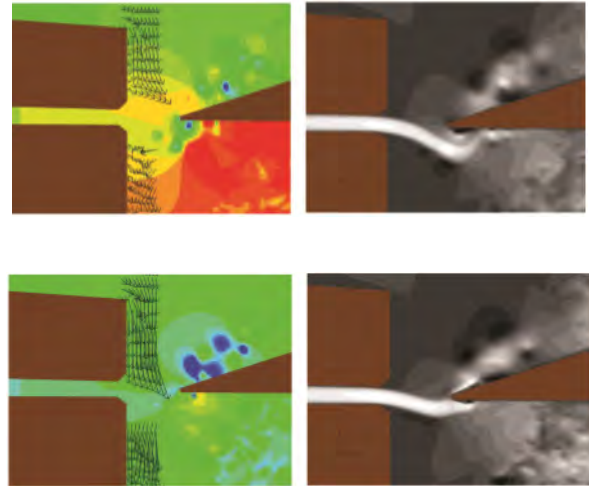


図 6 リコーダーから発生する音の数値シミュレーション

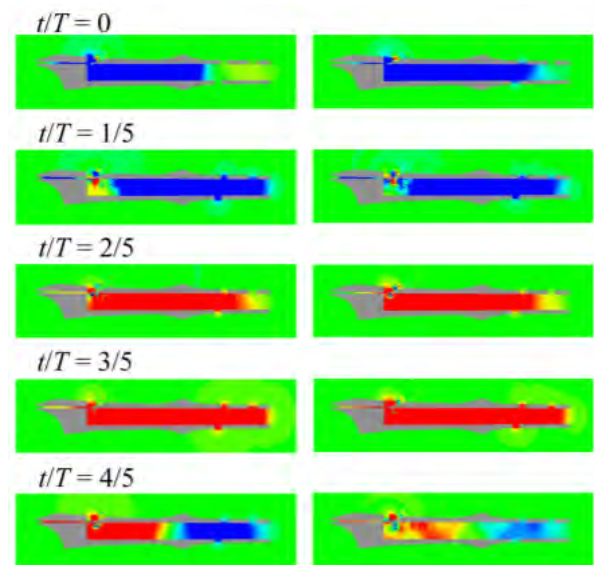


図 7 リコーダーの中の圧力の分布

リコーダーでは単一の周波数の音を発生するために共鳴管が用いられています。図 7 に共鳴管の中の圧力の分布を示します。緑色は大気圧を表し、赤はそれよりも高いところ、青は低いところを表しています。リコーダーの共鳴管にはいくつかの穴が空いていますが、この穴のところでは圧力が急激に変化しています。この穴のこ

ろで音の波長（周波数）が決まっているのです。ギターの場合は弦の長さで音の周波数を変えていましたが、レコーダーでは共鳴管の長さで音の周波数を変えているのです。

#### 文献

- 1) Van Dyke, M., ed.: An Album of Fluid Motion, The Parabolic Press (1982), 31, 70.
- 2) Hiroshi Yokoyama, et al., Direct numerical simulation of fluid-acoustic interactions in a recorder with tone holes, J. Acoust. Soc. Am. 138 (2), August 2015