空力騒音の計測

工学院大学工学部機械工学科
飯田 明由

1. はじめに

空力騒音の計測では，空力計測と音響計測の両方の計測技術が必要となる．空力計測と音響計測では計測機器も異なれば，計測機器の使用環境も異なるため，空力騒音の計測ではいろいろな工夫が必要である．本講習会は流体工学部門が主催ということもあり，流体計測については専門的に研究されている方が多いと思われるので，音響計測において注意すべき点と，空力音源の計測手法を中心に述べる．

2. 低騒音風洞

2.1風洞

空力騒音の基礎研究には低騒音風洞を使用するのが一般的である．工業製品の開発では製品そのものを無響室や半無響室で測定することも多いが，空力的な特性と音響的な特性を同時に調べるには，低騒音風洞を使用するのが便利である．空力騒音計測用の風洞として，国内では鉄道総合技術研究所の大型低騒音風洞（測定部 3m×2.5m U_{max}=125 m/s）が有名であるが，大規模な低騒音風洞は誰でも使えるというわけではない．大学や企業の研究室で一般的に利用できる規模としては，測定部断面 1m 程度，風速 30m/s-50m/s 程度の回流風洞を数m角程度の半無響室に設置したものである．低騒音風洞では主騒音源であるファンの騒音をサイレンサや吸音パネル，吸音エルボ等で十分小さくなるように設計し，なおかつこれらの部材による流れの乱れを抑制するための整流部の設計が必要である(1)(2)(3)．日本にある低騒音風洞のほとんどは回流式（室内回流式も含む）であるが，文献（2）では吸い込み式の風洞が紹介されている．低騒音風洞の場合，一般に騒音の測定の容易さから，開放型測定部を使用することが多い．開放型測定胴でかつ吸い込み式の場合，無（半）響室の気密の問題があり，運用時に問題が生じる可能性がある．ただし，吸い込み側に騒音源がないので設計は簡単である．

表 1 に低騒音風洞のスペックを示す（数値はいずれも公表値）．筆者は日立製作所の低騒音風洞や JR 東海小牧の低騒音風洞の設計に関わったが，小型低騒音風洞でも風洞メーカーに設計・製作を依頼する数千万円から億の単位の予算が必要である．自動車用実車低騒音風洞では数 10 億円の予算が必要（ライムラー・クライスラーの低騒音風洞：約 60 億円）である．空力騒音の研究は企業の研究開発の重要課題になりつつあるとはいえ，費用対効果を考えるとかなり高額な研究設備である．大学の研究室では．小型低騒音風洞でもかなり高額な設備である．

図 1 に示す小型低騒音風洞は筆者が大学に移ってから学生と一緒に製作したものである．計画から試運転まで約 1 年かけて製作し，その後 1 年ほど調整を行い，現在，研究に利用している．学生が製作することが難しい縮流ノズル（縮流比 9:1）と反無響室のフレームのみを外注（70 万円）で製作した．ファンは廃品を再利用した．反無響室に使用した吸音材（Bridgestone 製 VH2050D）が約 40 万円，そのほかはベニア板，アングル材，鉄板（40 万円），インバータが 20 万円であり，総額 200 万円程度である．測定部断面 30cm 角，風速 35m/s というスペックは低騒音風洞としては最低限のレベルであるが，低予算であっても基礎研究が可能な低騒音風洞を製作することが可能である．シロッコファンを使用していること，部屋が狭いためファン下流及び測定部下流に十分な長さが確保できていないことから，現在のところ乱れ強度が 1.8%とやや大きい．この点は現在，整流格子を追加するなどの対策を進めている．

このような簡易低騒音風洞でも風速 30 m/s 時の暗騒音レベルは 54dB 以下である．騒音スペクトルには特徴的なピークはなく，円柱から放射される空力騒音の測定結果では十分な SN 比が得られていることがわかる（図 2）．

日立製作所機械研究所，東大生研，工学院大の3つの風洞で自動車ドアミラーモデルの騒音を測定した結果，3つの風洞で測定された騒音スペクトルは 1kHz 以上の周波数帯域では良く一致することが確認された．工学院大の風洞の場合，低周波数域で風洞の乱れの影響のためか，騒音レベルがやや大きくなったが，風洞の大きさや作りがことなってもモデルから放射される空力騒音はほぼ一致する．したがって，低予算の手作り小型風洞であっても空力騒音の研究を行うことは可能である．尚，設置スペースとして約 6m×4m，高さ 3m 程度の部屋が必要である．

表1 低騒音風洞のスペック

	風速 [m/s]	測定胴 W×H×L [m]	騒音レベル [dB]	一様性 [%]	乱れ強度 [%]	備考
鉄道総研大型騒音風洞	83.3	3.0×2.5	75dB(A)	0.7%以下	0.2%以下	柔毛材
Audi AG	83.3	3.24×2.79	78dB(A)	-----	----	アクティブ消音
荏原総研	35	0.4×0.4	48dB(A)	-----	----	無響室室内回流
JR 東海小牧風洞	83.3m/s	1.0×0.8×5	78.5dB(A)	1.0%以下	0.4%以下	サイドストリーム
ダイムラー・クライスラー	75m/s	7×4×12	70dB(A)	0.5%	0.1%	
日立製作所機械研究所	50	0.5×0.5×1.5	60dB(A)	1.0%以下	0.4%	小型風洞
工学院大	30m/s	0.3×0.3×1m	54dB(A)	1.0%以下	1.9%	制作費 200 万円

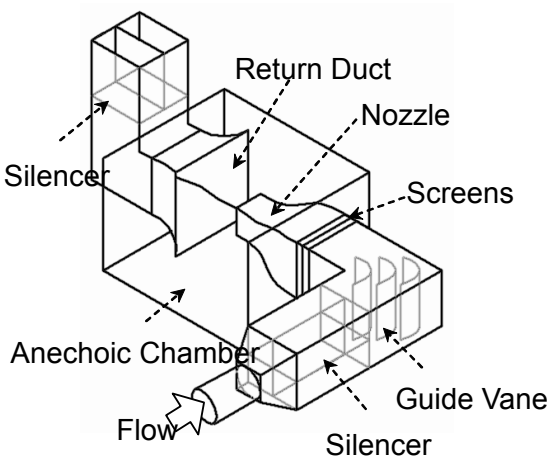
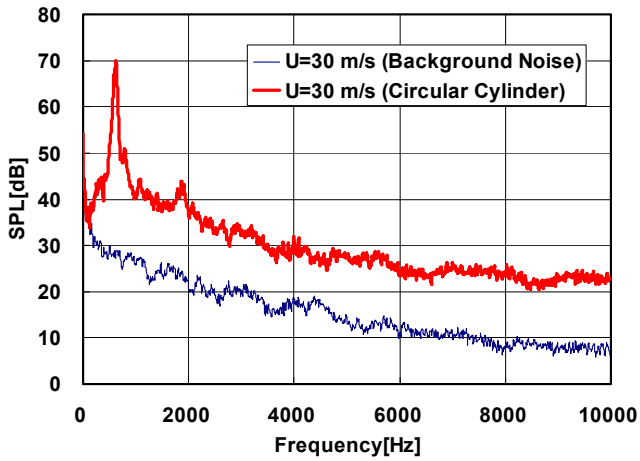


図 1　小型低騒音風洞（工学院大学・工学部・流体工学研究室）



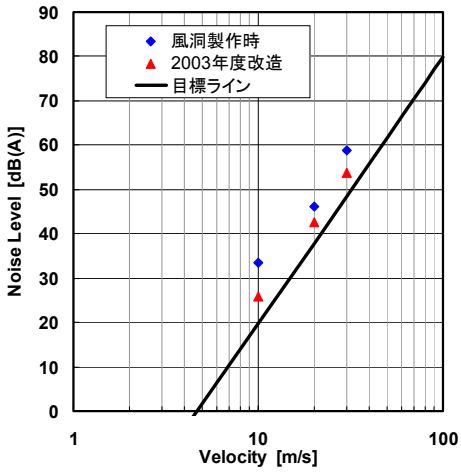


図 2　小型低騒音風洞の空力騒音特性

2.2近距離場と遠距離場

開放胴での空力騒音計測では，騒音計のSN比を考慮して，気流の影響を受けない範囲で，できるだけ音源に近い位置で測定を行いたい．しかし，流れによって物体から放射される圧力波には音源近傍（近距離場）において擬似音波（音波ではなく，流れ場の近傍にできる圧力変動．音圧レベルが距離の2乗に反比例するのに対して距離の4乗に反比例する）が含まれる．このため，音波として（遠方に）放射される空力騒音を計測対象としている場合，測定位置において近距離場（擬似音波）の影響がどの程度なのかを考慮する必要がある．特に非圧縮の流れ解析を利用した空力騒音解析モデルの場合，遠距離場の仮定を用いている場合が多いので，実験データに近距離場の影響が含まれていると比較することが難しくなる．したがって，測定対象とする音の周波数が擬似音波の影響を受けないように測定位置を決める必要がある．

遠距離場（音波）と近距離場（擬似音波）の音圧の比ξは

$$\xi = \frac{2\pi f r}{c} \tag{1}$$

と表せる[4]．ここで r は測定位置，f は音の周波数，c は音速である．仮に遠距離場と近距離場の比が10dB以上あれば，近距離場の影響を無視できるとすれば，式(1)から測定位置 r における測定可能な周波数を推定することができる．たとえば，音源から1m程度の位置で騒音を測定する場合，170Hz以下の周波数成分には擬似音波が含まれている可能性があるので，実験データと解析結果を比較する場合は注意が必要である．

2.3測定室内の音の減衰と反射

測定位置を決定する場合，遠距離場の仮定以外にも，音源位置とマイクの相対的な位置関係による音響特性についての検討も必要である．すなわち，音源から直接マイクに到達する直接音に比べて壁面や床面からの反射音が十分に小さくなる位置を選ぶ必要がある．低騒音風洞の測定室は一般的に無響室か，それに近い構造になっていることから，風洞の暗騒音を測定する場合は壁からの反射の影響は無視できる程度である．しかし，新幹線や自動車モデル等を測

定する場合，風洞測定部下面に地面板といわれる平板を設置することが多い（自動車用風洞では，床そのものが風洞測定部の下面になっていることが多い）．このような場合，音源と地面板及びマイクの位置によって直接音と間接音（反射音）の割合が変化する．

図 3 は低騒音風洞に新幹線等のモデルを設置した場合の模式図である．音源は風洞中央部にあると仮定する．ここで音源をランダムノイズの点音源とみなして Snell の法則を用いて，直接音と間接音を計算する．

空気中の音の吸音を含めたマイク設置位置における音の減衰量Δp は

$$\Delta p = 10\log\left(\frac{r_{ref}}{r}\right)^2\left[R_0 \pm \frac{r}{r_1}\sqrt{1-\alpha_1}R_1 \pm \frac{r}{r_2}\sqrt{1-\alpha_2}R_2\right]^2 \tag{2}$$

$$R_n = 10^{-\alpha_{air}(r_n - r_{ref}l)/20} \tag{3}$$

と表すことができる[2]．ここで r_{ref} は音源の大きさを表す基準長さ，r は音源からマイクまでの直接音の経路長さ，添字 1,2 はそれぞれ壁面 1,2 による間接音（反射音）に関する指標である．$\alpha_{1,2}$ は壁面の吸音率，α_{air}（～0.0048dB/m）は空気中の単位距離あたりの吸音率である． 無響室の天井部分の吸音率はほぼ 0.95～1 程度である．一方，地面板は音を反射すると考え α_2～0 として音響特性を調べておく必要がある．

図 4 に測定用マイクを音源と同じ高さに置いた場合と，地面板の高さに設置した場合の比較結果を示す．マイクを音源位置に置いた場合は，地面高さに置いた場合に比べて 2.3dB 近く騒音が増加する．地面板による間接音の影響は，音源の位置が測定対象毎に異なるような場合や音と流れの相関を計測するような場合に問題となる．したがって，このような場合は，マイクを地面板高さに設置して計測を行うか，複数のマイク位置で測定を行い，反射の影響を確認する必要がある．また，自動車用風洞のように地面板がある場合は，床面を吸音処理した場合に比べ，約 3dB 騒音が増加する．

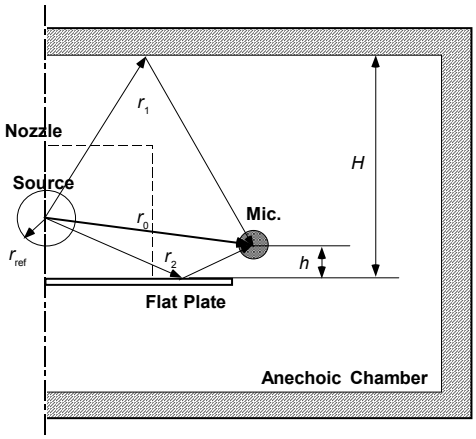


図 3 風洞測定部における音の反射

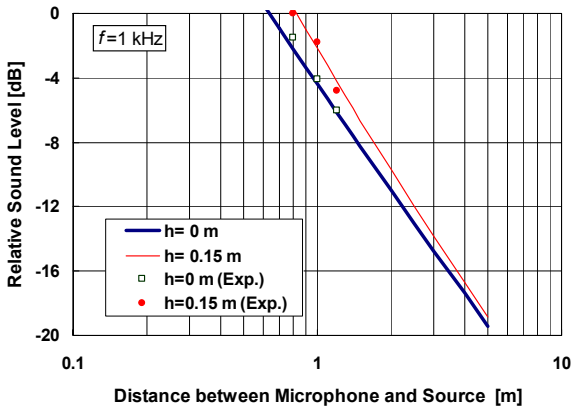


図 4 測定部における地面板の影響

円柱や翼など二次元モデルを用いた流れの基礎実験では，風洞気流を一様に保つため密閉型の測定部を使用することが多いが，空力騒音の計測では，inflow マイクを使う特別な場合を除いて，開放型の測定部内部にモデルを設置して測定を行うことが多い．このような開放型の測定部において，円柱や翼などの二次元モデルを測定する場合，ポテンシャルコア外部のせん断層をモデルが横切るため，流れが三次元的になり，密閉胴を用いた流れの計測結果と比較することが難しくなる．流れ場の二次元性を保ち，円柱や翼などの基本形状から発生する空力騒音の発生機構を調べる場合，地面板と平行に天板を設置したセミ・オープン型の測定部を使用することが多い[(1)(2)(3)(5)]．このような場合，天板による反射（図 4 において経路 1）も考慮しなくてはならなくなるが，無響室のサイズに比べて測定部の大きさが小さいため，天板による間接音の影響は相対的に大きくなる．そこで，天板をエア・フィルターなどに用いられるポーラス材と吸音材で作成し，天板の音響的な影響を取り除く必要がある．

図 5 にポーラス材を用いた測定部の構造を示す．天板は厚さ 10mm のエア・フィルター（平均孔径 130μm，気孔率 85%）を穴開鉄板（厚さ 1mm 開口率 45%）で補強したパネルからなり，穴開鉄板の上に厚さ 50mm の吸音材を設置した．このパネルを天板として取り付けると，流れはパネルに対してほぼ平行に流れるが，音の反射は抑えられ，パネルがない場合とほぼ同等の音響特性を示すようになる．図 6 に藤田ら[5]が行ったポーラス材測定部の音響特性を示す．ポーラス材を使用した測定胴は，ほぼ自由音場に近いことがわかる．

ポーラス材で密閉型測定部を作成し，空力音を測定した例（Jacob ら[6]）や風洞壁面をケブラー膜で作成し，ケブラー膜を介して騒音を測定する方法も開発されている[2]．これらのポーラス材の音響透過性能は数kHz 以下の周波数域において 2dB 以内であり，風洞気流を一様に保ちながら測定する手法として注目されている．ケブラー壁面にマイクアレイを埋め込んだ実験[(2)(7)]も行われているが，高周波数域での計測では位相特性の補正が問題となる． 密閉胴内での空力騒音測定が可能になれば，空力特性と騒音の同時計測を行う上で有効であり，測定部壁面の音響特性に関する研究が今後必要であると考えられる．

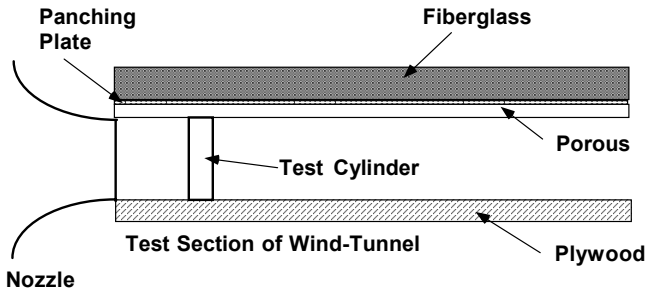


図 5 音響透過パネルの一例

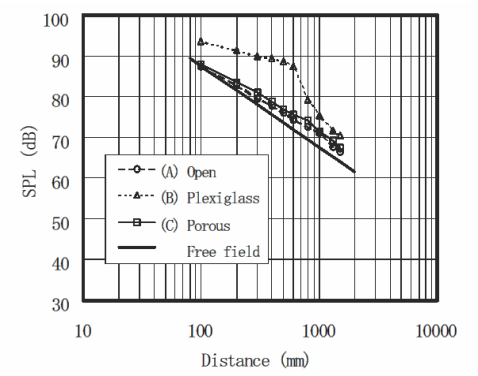


図 6 測定部の音響特性

3. 相似則

製品開発などを行う場合，模型実験が行われることが多いが，その場合，流れ場と音場の両方ともに相似であることが望ましい．しかし，実際には流れと音の相似則を同時に満たすような実験は非常に難しい．特にエッジトーンやフィードバック騒音などの音響的な共鳴を伴う場合は，模型実験で相似則を成り立たせるのはかなり難しい．たとえば，音響共鳴がある場合，模型が 1/5 になった場合，流体力学的に発生する音は速度が同じ場合は渦スケールも 1/5 になるのでほぼ 1/5 になる．この場合，共鳴周波数も 1/5 になっているので音の波長と渦のスケールは相似である．しかし，模型と実車の速度が同じためレイノルズ数は一致していないことになる．流れ場のレイノルズ数依存性が小さい場合は，音響共鳴も含めて実車と模型の空力音はほぼ相似とみなせるが，翼のエッジ音の場合のように流れ場のレイノルズ数依存性が高い場合は，このような実験では空力騒音を評価できない可能性がある．

ここでは，簡単のため音響共鳴やフィードバックがない場合を考える．注意してほしいのは空力騒音に関しては，音響共鳴がない簡単な場合でも相似則が確立されていないため，モデル実験の結果を判断することが難しい場合があることである．実験データの多くは 1/3 オクターブ分析されるため，一見相似則が成り立っているように見えても，そこにはかなりの近似があることに注意すべきである．

マッハ数の小さな流れ場に置かれた物体から発生する空力騒音は Lighthill-Curle の理論により，以下のように記述できる．

$$\overline{p^2(r)} = \frac{\alpha C_{LR}^2}{16}\frac{\rho^2}{c^2}\frac{D^2 S_t^2 U^6}{r^2} \tag{4}$$

ここで， P^2は音圧，c は媒質の音速，ρ は媒質の密度，D 及び L は物体の寸法，r は音源と観測点との距離，Uは流れの速度，St はストローハル数，C_{LR} は流体力（揚力及び抗力）係数の実効値，α は無次元相関長さである．モデルにおける測定値と実機における測定値の比をとると，

$$\frac{\overline{p^2(r)}}{p_m^2(r)} = \left(\frac{c_m\rho}{c\rho_m}\right)^2\left(\frac{U}{U_m}\right)^6\left(\frac{D}{D_m}\right)^2\left(\frac{r_m}{r}\right)^2\left(\frac{\alpha S_t^2 C_{LR}^2}{\alpha_m S_m^2 C_{LRm}^2}\right). \tag{5}$$

となる．ここで，添え字 m はモデルの値を示す． 騒音の場合，デシベルで表記することが一般的であるので，式(5)を対数で表すと

$$SPL_e = SPL_m + 20\log\left(\frac{c_m^2\rho^2}{c^2\rho_m^2}\right) + 60\log\left(\frac{U}{U_m}\right) + 20\log\left(\frac{D}{D_m}\right) - 20\log\left(\frac{r}{r_m}\right) + 10\log\left(\frac{\Phi}{\Phi_m}\right) \tag{6}$$

となる．ここで式(6)の右辺第 1 項はモデルの騒音の測定値，第 2 項は媒質の物性値，第 3 項は速度比，第 4 項はモデルスケールの逆数，第 5 項は測定位置の比である．第 6 項はストローハル数，流体力係数，無次元相関長の項をまとめたものであり、レイノルズ数に依存する項である．第 6 項以外は測定あるいは実験条件として設定可能なことから既知の値とみなせる．流れが完全に相似で第 6 項がレイノルズ数に依存しない場合は模型実験から実機の騒音を推定することが可能である．

一方，周波数特性はモデルと実機でストローハル数が一定であると仮定すると，

$$f = f_m \frac{D_m}{D}\frac{U}{U_m} \tag{7}$$

と表せる．騒音レベルを評価する場合，周波数を式(7)を用いて換算したのち，A 特性補正を行うのが一般的である．図 7，図 8 にパンタグラフの縮尺モデルとその空力騒音スペクトルを示す．模型実験により実機の騒音スペクトルを精度良く予測することが可能であることがわかる[8]．

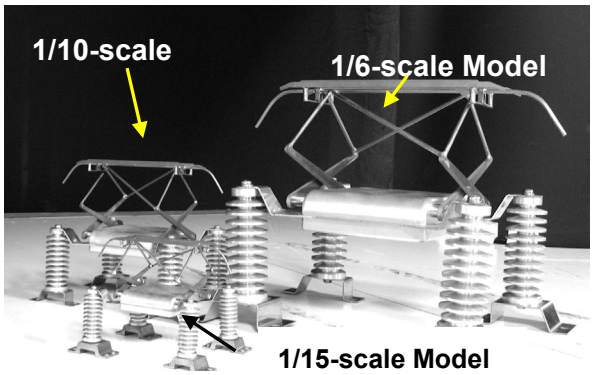


図 7　風洞実験用縮尺モデル

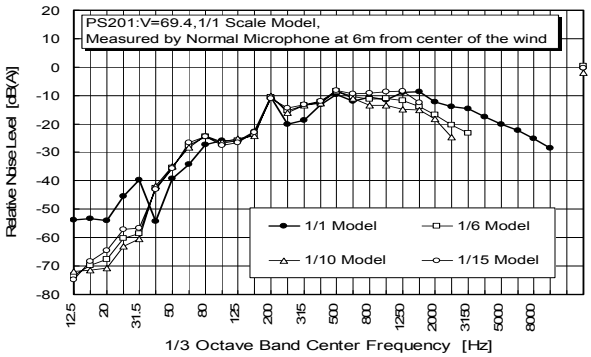
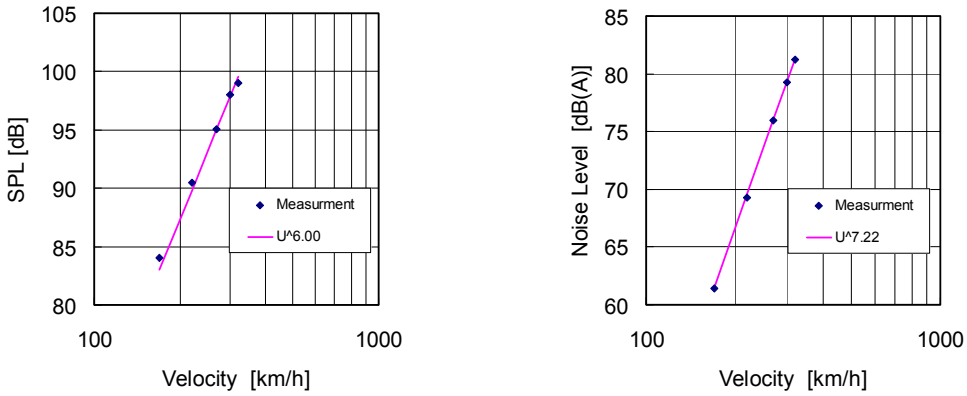


図 8 相似則を用いた空力騒音予測結果

注意点：ここまでの議論は問題を単純化するため，物体の大きさと音の波長の相似性を無視している．スケールモデルと実機モデルではモデル寸法だけでなく，実験の流速も異なる．周波数は式(7)に示したように物体の代表寸法と速度の関数であるが，式(7)を用いて周波数換算を行うと，音の波長と渦スケールの比は，実機とスケールモデルでは異なるという問題が生じる．ここで渦スケールと音の波長の比はマッハ数に比例することから，実機モデル試験(U=75m/s)のほうが，スケールモデル（U=50m/s）に比べ，渦スケールと波長の比が大きい．この問題は特に低周波数で顕著になる．しかし，騒音問題として考える場合，音圧データを A 特性処理することが一般適であり，比較的低周波数の成分は A 特性補正により，レベルが小さくなる．このため，全体騒音レベルへの寄与が小さくなると予測される．また，式(7) は波長が物体に比べ大きい，コンパクトボディの仮定を置いているので，波長が小さくなると式(3)の厳密性が失われる．ただし，1/10 スケールモデル程度の場合，これらの問題はあまり顕著には表れないようである．）

A 特性補正は人間がある一定音圧の音を聞いたときに，周波数によって音のレベルの感じ方が違うことを補正したものである．したがって，A 特性補正は人間工学的に有効であっても空力音の発生機構との直接的な関係はない．一般に物体から放射される空力音は Lighthill-Curle の理論により速度の 6 乗に比例することが知られている．しかし，速度の増加に伴い周波数も変化するため，A 特性補正を行って空力騒音の速度依存性を評価すると速度の 6 乗則よりも騒音レベルの変化が大きくなる．具体的にはパンタグラフなどの模型の空力騒音を測定すると図 9 に示すように F 特性では 6 乗で変化しても A 特性では 7 乗となる．これを速度が速いと Lighthill-Curle の式が成立しないと解釈している研究発表がみられるが A 特性はあくまで人間の聴感上の問題であって空力騒音の発生機構とは直接関係ないことに注意すべきである．

流れによって物体に作用した流体力に起因する 2 重極音と渦から直接放射される 4 重極音のレベルはマッハ数の 2 乗に比例する．したがって，非圧縮流れに相当する M=0.3 以下の場合，二重極音は四重極音よりも 10dB 以上大きい．もちろん渦音の影響が皆無というわけではないが，速度依存性を変えてしまうほどの影響はないと考えられる．もちろん，Lighthill-Curle の理論が間違っているというわけでもない．（Lighthill-Curle の理論も完全なものではない．しかし，騒音レベルを dB 表示で比較する場合，ほぼ正しいと見て問題ないと考えられる．）ただし，Olsen ら[9]が噴流を非常に大きな平板に直接吹き付ける実験では，平板によって噴流からの放射音が大幅に増加し，平板（固体壁）の影響が大きいにも関わらず，騒音が速度の 8 乗に比例するという結果が得られている．したがった，噴流の中に非常に大きな平板が置かれた場合は，四重極音源の放射効率が極めて大きくなる場合がある．



(a) F 特性　　(b) A 特性

図 9 空力騒音の速度依存性

4. 表面圧力変動計測

低マッハ数流れの中に物体が置かれた場合の空力音は Lighthill-Curle の式

$$p_a(x) = \frac{x_i}{4\pi c x^2}\frac{\partial f_i}{\partial t} \tag{10}$$

$$f_i = \int_S n_i P dS \tag{11}$$

で記述することができる．ここで P_a は音圧，f_i は物体に働く流体力である．P は物体表面の圧力，n_i は外向き単位法線ベクトルである．Lighthill-Curle の理論によれば，流れの中に物体が置かれた場合，物体に働く流体力あるいは物体表面の圧力の時間変動により空力音が発生する．したがって，物体に働く流体力あるいは物体表面の圧力変動を測定することにより空力音を求めることができる．

図 10 に Lighthill-Curle の理論を用いて円柱表面の圧力変動から空力騒音スペクトルを予測した結果を示す[10]．図 11 は実験に用いた円柱である．直径 D= 40 mm，長さ L=500 mm の円柱の内部に 1/2 インチのコンデンサ・マイクロフォンを 12 個埋め込み，円柱表面に設けられた直径 1mm の圧力孔を介して円柱表面の圧力変動を計測した．圧力孔の共振周波数（Helmholtz 共振周波数）は 1380 Hz である．カルマン渦の基本周波数は 18.75 Hz から 262.5 Hz であり，共振周波数より十分低い値である．

表面圧力変動から求めた空力騒音はカルマン渦の基本成分の 5 倍程度の周波数までマイクロフォンによる直接測定結果とよく一致することがわかる．

翼のような薄い物体にマイクロフォンを埋め込むことは難しいので，翼表面の静圧変動計測には半導体圧力センサが利用されている．図 12 は Kulite 社製の半導体圧力センサを翼面に埋めた例である．

リーディング・エッジだけでなく，トレーリング・エッジ付近まで圧力センサを埋め込むことが可能である．ただし，小さいとはいえ圧力センサの受感部は直径 2mm，長さ 20mm 程度の円柱のため，そのまま翼内部に埋め込むことは難しい．そこで図 12 に示すように，壁面に垂直に開けられた圧力孔に対して側面から半導体センサを挿入して翼モデルに埋め込んだ．このため，センサと圧力孔の間には 0.5mm ほどの空隙ができる．圧力孔と空隙によってヘルムホルツ共振が生じる．この場合の共振周波数は約 1 7 kHz である．したがって，このシステムで測定可能な周波数は約 12kHz である．より高い周波数の測定を行うにはセンサ自体を小型化するなどして，センサと測定孔の間の空隙を小さくする必要があるが，一般に受圧部の面積と圧力測定感度が比例するため，極端に小さなセンサにすることは難しい．

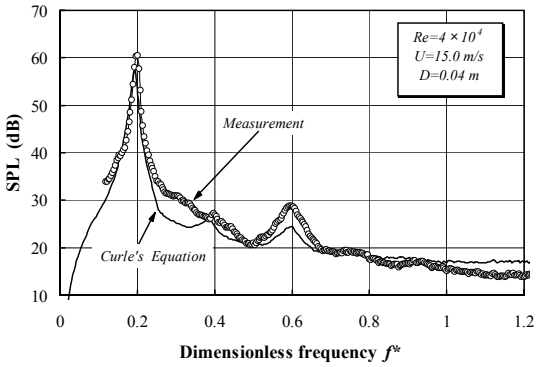


図 10. 空力騒音スペクトルの予測結果

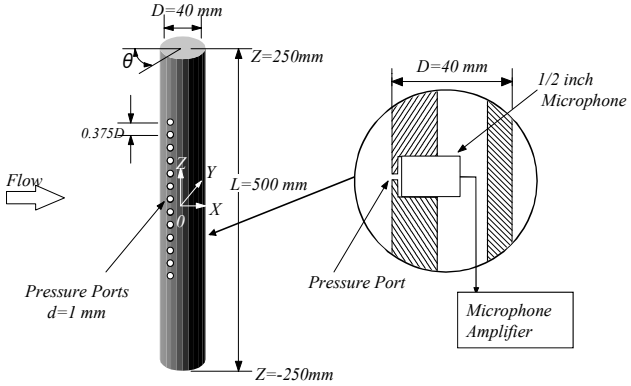


図 11. 壁面静圧変動測定装置

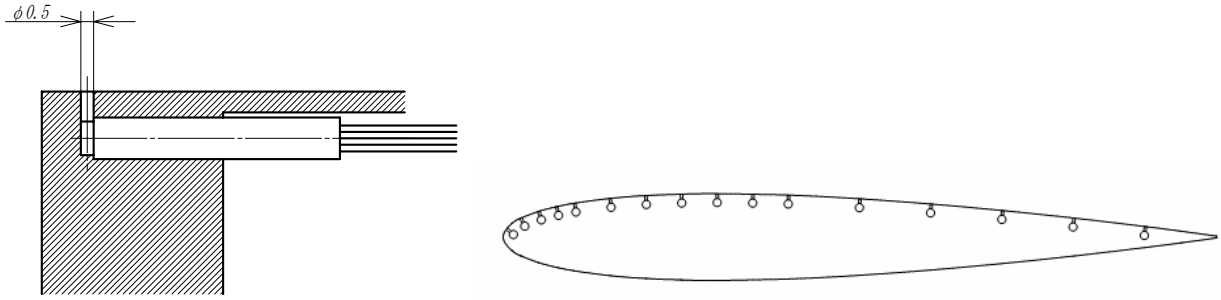


図 12. 壁面静圧変動測定用センサ

5.　空力音源計測

空力騒音の発生部位を調べるために，マイクアレイ等を用いた音源分離実験が試みられている．マイクアレイは当初，新幹線や航空機の野外環境騒音の測定[11][12]に使用されていたが，最近では風洞実験にも使用されはじめている[2][7][13][14]．マイクアレイによる音源分離方法には，近接音響ホログラフィ法[15]と Phased Array 法があるが，風洞実験では Phased Array 法が使われることが多い．また，パラボラ式の超志向性マイクを用いた風洞実験も行われている[16]．

アレイを設計する場合，少ないマイク数でサイドローブが小さくなるよう設計するべきであり，マイクをランダムにした配置したランダム・アレイ[2]やスパイラル状に配置したスパイラル・アレイ等[2][12][13][14][16][17][18]が開発されている．複数のスパイラル配置を組み合わせたマルチ・アーム・スパイラル配置がサイドローブの低減に効果的である[2]との報告があるが，チャンネル数が 100 以上になるため，計測規模が大規模になる傾向にある．車両計測に広く利用されている X 字型アレイは比較的少ないチャンネル数で，サイドローブの小さな計測ができるため，風洞実験に適したアレイ配置である[11]．

図 13 に変形 X 型のマイクアレイ装置を用いた音源分離実験の写真を示す．図 14 はその計測結果である．パンタグラフの舟体（架線と接触して電気を集電する部分．矩形断面のため下流にカルマン渦ができるため，強い音源となることが知られている）が音源であることがわかる．

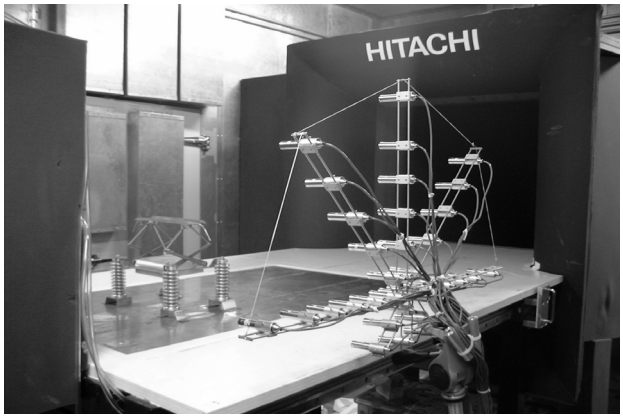


図 13　マイクアレイによる音源分離実験

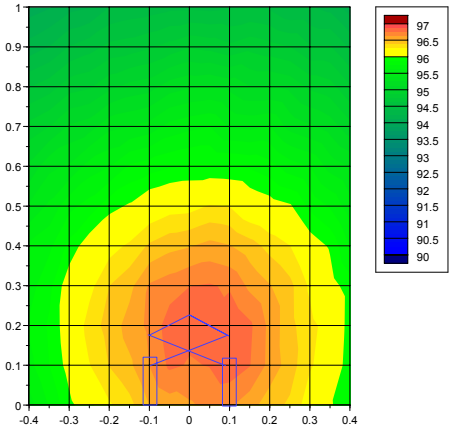


図 14　パンタグラフ周囲の空力騒音分布

マイクアレイ等を用いた音響学的な音源の同定は，空力騒音の発生機構に関する知見や音源対策における情報を提供するが，流体騒音を発生させている渦の非定常運動と直接結びつけた情報を得るには，流体力学的な知見と音響特性に関する深い洞察力が必要となる．したがって，渦運動と空力騒音の関係をより直接的に検討できる音源探査方法が必要である．

Howe[19]は低マッハ数流れの中に物体が置かれた場合の空力騒音は渦度と速度場の外積とコンパクト・グリーン関数を用いて，以下のように表すことができることを示した．

$$P_a(\mathbf{x},t) \approx \frac{-\rho_0 x_i}{4\pi c|\mathbf{x}|^2}\frac{\partial}{\partial t}\int_V (\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{u})(y,t-|\mathbf{x}|/c)\cdot\nabla\mathbf{Y}_i d\mathbf{y} \tag{12}$$

ここで，P_aは音圧，cは音速，ωは渦度，uは速度，ρ_oは媒質の密度である．コンパクト・グリーン関数は，物体を横切る非圧縮流れの速度ポテンシャル Y_i の勾配によって表される．

円柱の場合，速度ポテンシャルは

$$\mathbf{Y}_i = y_i\left(1+\frac{d^2}{4\sqrt{y_1^2+y_2^2}}\right)\quad i=1,\ 2;\ \ Y_3 = y_3\,. \tag{13}$$

と表すことができる．したがって，円柱後流の渦度分布を計測することにより，式（12）と式（13）から渦の非定常運動によって発生する空力騒音の発生部位を調べることができる．コンパクト・グリーン関数によって物体によるスキャッタリングの効果も表すことができるため，渦運動の寄与を定量的に評価することができる．渦度の計測には熱線流速計を複数組み合わせた渦度センサ[20]や渦度と密接に関連のある静圧変動計測データを用いる方法[20][21]が一般的である．

図 15 に Howe の理論に基づいて求めた空力音源分布と，渦度と空力騒音の相互相関から求めた空力音源分布との比較を示す[22]．円柱直後のはく離せん断層内の強い渦層が不安定になり，カルマン渦として巻き上がる部位（X/D=1.5, Y/D=±0.4）が音源となっていることがわかる．

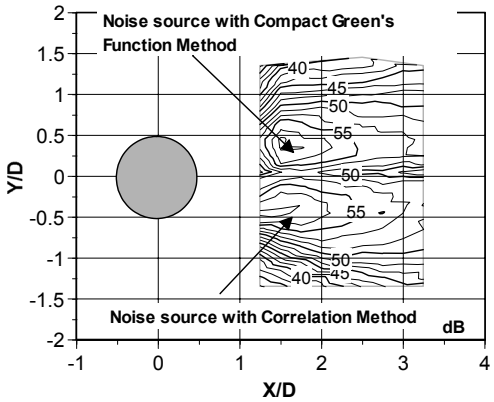


図 15　円柱後流の空力音源分布
（上半分：グリーン関数法，下半分：相関法）

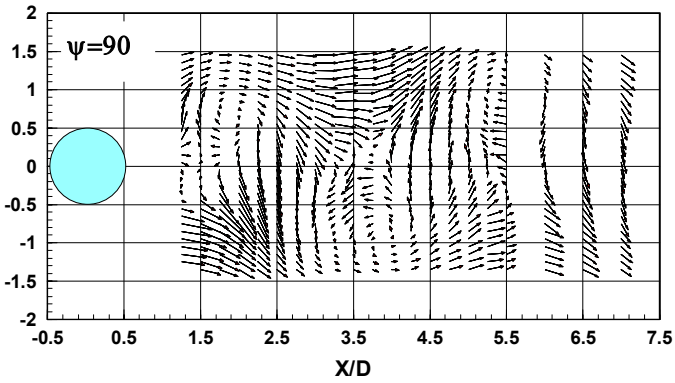
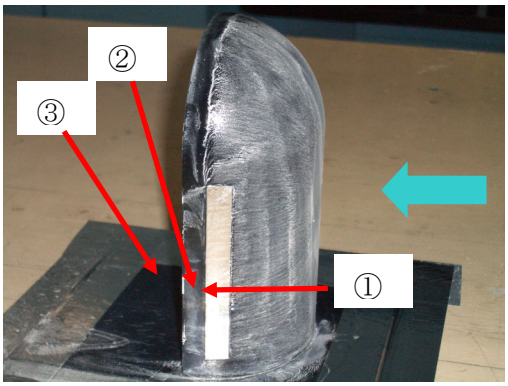


図 16　速度ベクトル

6.　相関計測

熱線流速計や LDV を使って空力音と流れの相関計測も行われている．図 17 はドアミラー模型周りの流れと音の相関計測結果である[23]．左の図は油膜法による可視化写真である．ドアミラーモデル表面には段差が設けられている．熱線流速計を用いて，段差直後，段差の下流，ミラー下流の流れと音の相関を調べたところ右の図に示すように段差直後の速度変動と空力騒音に強い相関があることが確認された．流れの変動はβの後流に比べて非常に小さいが段差直後の乱れが空力音の発生に寄与していることがわかる．熱線流速計を用いた計測ではセンサと支柱の騒音が問題になる．音の周波数帯域が違う場合は問題ないが帯域が近い場合は，サポートの低騒音化が必要になる．

LDV 計測の場合，シーディングが問題となる．熱線流速計の場合と同じようにシーディング用のパイプの騒音が問題となる．また，シーディングにオイルミストを使うと低騒音風洞に使われている吸音材を劣化させる恐れがある．図 18 は東大生研加藤研で行われている低騒音風洞での LDV 計測の例である[24]．整流胴内部に加圧したウォータミストを散布し，LDV 計測を行った．整流胴内は流速が遅いため，騒音の発生はほとんどない．乱れの影響もほとんど見られなかった．シーディングには水を使っているため吸音材の劣化の影響も少ない．



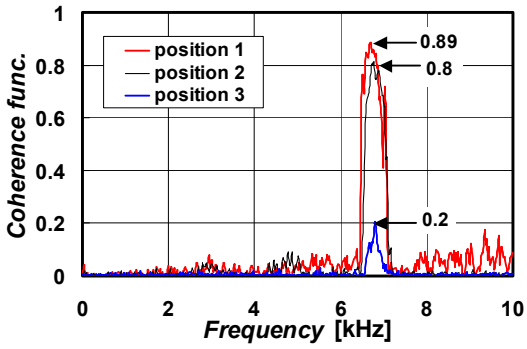


図 17　ドアミラーから放射される空力音と流れの相関解析

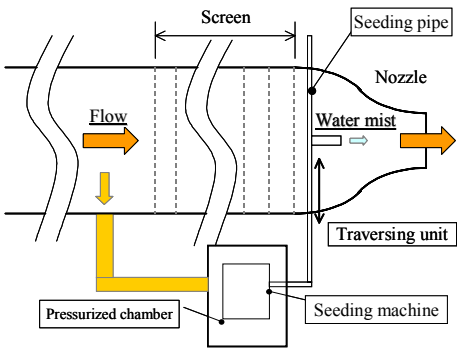


図 18　低騒音風洞用シーディング装置

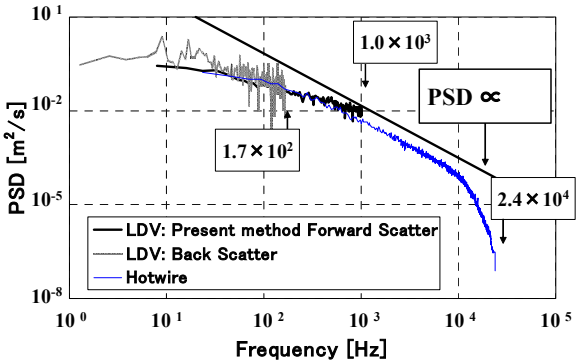


図 19　低騒音風洞での LDV 計測例

7. ダイナミック PIV 計測の可能性測

前説までに示した計測例では，渦度の計測に熱線流速計と静圧変動プローブを用いているが，これらの計測では，逆流の計測や物体近傍の計測が困難なこと，空間分布の瞬時計測が難しいなどの問題がある．Particle Image Velocimetry (PIV)は画像計測技術の進歩により急速に発展，普及しており，空力騒音源の計測に役立つものと期待されている．現在のところ時間分解能を向上させることが課題となっているが，原理的に流れ場の空間構造の計測が可能であり，流れと音の相関解析に威力を発揮すると思われる．近年，高速・高出力の半導体レーザー励起式完全固体化レーザー（パルス間隔最大 30kHz，10kHz パルスの平均出力 75W 以上）が開発され，このレーザーと高速カメラを組み合わせたダイナミックPIV システムが速水・岡本ら[25]を中心に開発が進められている．ダイナミック PIV を用いることにより，画像解像度 1024×1024 において 周波数分解能 1kHz,または解像度 256×256 において周波数分解能 12kHz の測定が可能である．ダイナミック PIV により速度場及び渦度場の時系列データを取得することとることができれば，非定常渦度場と空力騒音との直接相関計測が可能になる．

空力騒音計測では，流体計測と音響計測という2つの異なる分野の計測技術を組み合わせる必要がある．音響計測に偏った計測であっても，流れ場に重点を置きすぎた計測でも良い結果が得られない．両者のバランスをうまく取りながら空力騒音の計測を行うことが必要である．マイクアレイ等の音源探査手法が風洞実験でも確立しつつあり，今後はダイナミック PIV や感圧塗料を利用した計測が主流になると考えられる．

参考文献

(1) Fujita H., Iida A, Takano Y. and Kato C., ”Development of a Low Noise Wind Tunnel for Aerodynamic Noise Research”, *Proc. INTER-NOISE93*, 1787-1790 (1993).

(2) Mueller T. J., *Aeroacoustic Measurements*, （Springer 2002）

(3) 望月 修，丸田 芳幸，流体音工学入門，（朝倉書店 1996）

(4) Fujita H. and Kovasznay L.S.G ., *AIAA*, **12**, 1216-1222, (1974)

(5) 藤田肇 他 4 名，”二次元モデルから発生する空力騒音の実験的研究（第 1 報,風洞測定部壁面の端板効果と壁面材料の検討）”，機論 **B**62-604，187–193，（1996）

(6) Jacob, M.C., et al., *6th AIAA Aeroacoustic conference*, **AIAA Paper 2000-2011**, (2000)

(7) Jaeger S. M., et al., *6th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference*, **AIAA Paper 2000-1937**, (2000)

(8) Iida A, Otaguro T, Nagarekawa H., Torii A. and Naruse I., “Similarity law of Aerodynamic Noise Generation”, *6th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference*, **AIAA Paper 2000-2012**, (2000)

(9) Olsen W. A., Miles, J. H. and Dorsch, R. G.., “Noise Generated by Impingement of a Jet Upon a Large Flat Plate”, **NASA TN D-7075**, (1972)

(10) 飯田 明由，藤田 肇，高野 靖，加藤 千幸，”空力音の発生機構に関する実験解析 (第 2 報:表面圧力変動と空力音の相互相関について)”，機論 **B**62-604，4160-4167, (1996)

(11) Takano Y., “X-Shaped Two-Dimensional Microphone Array System for Measuring Noise-Source Distribution on Moving Vehicles”, *JSME International Journal* (C), **41**(1), 46-50, (1998).

(12) Jean P. and Michel F., “Localization of the Acoustic Sources of the A340 with a Large Phased Microphone Array During Flight Tests”, *8th AIAA Aeroacoustic conference*, **AIAA Paper 2002-2506**, (2002).

(13) Underbrink J.R., “Circular Symmetric, Zero Redundancy, Planar Array having Broad Frequency Range Applications”, US Patent **No.6205224** (2001) .

(14) Stefan O. and Sijtsma P., “Determination of Absolute Levels from Phased Array Measurements Using Spatial Source Coherence”, *8th AIAA Aeroacoustic conference*, **AIAA Paper 2002-2464**, (2002) .

(15) Nakamura M., Komine T., Tsuchiya M. and Hald J., “Measurement of Aerodynamic Noise Using STSF”, Bruel & Kjaer Application Note BO 0392-11 (1993).

(16) 長倉 清，高石 武久，“風洞実験による空力音の評価方法”，**RRR2000-8**，6～9 , (2000)

(17) Steinberg D., “Principles of Aperture and Array System Design”, (John Wiley and Sons Inc., New York, 1976).

(18) Dougherty R., ”Spiral-Shaped Array for Broadband Imaging”, US Patent **No.5838284**, (1998).

(19) Howe M.S., *Theory of Vortex Sound*, (Cambridge Univ. Press. 2002)

(20) Iida A, Otaguro T, Kato C. and Shimode S., “Analysis of Aerodynamic Sound Source with Measurement of Static-Pressure Fluctuation”, *JSME International Journal*, (B) **42**(2) , 596-604, (1999) .

(21) Hiramoto R. and Toyoda K., “Study on Sound Source of a Circular Jet by Simultaneous Measurements of Velocity and Pressure Fluctuations”, *Proc. The Fifth JSME-KSME Fluid Engineering Conference*, 497-505, (2002) .

(22) Iida A., Mizuno A. and Kato C., “Visualization of Aerodynamic Sound Source with Compact Green's Function”, *8th AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference*, **AIAA Paper 2002-2572**, (2002) .

(23) 小久保 あゆみ，貴島 敬，加藤 千幸，飯田 明由，“ドアミラーから発生する空力騒音と流れの相関計測”，機械学会流体工学部門講演会論文集，（2004）

(24) 小久保あゆみ，鈴木 康正，関 俊一，加藤 千幸，飯田 明由，“低騒音風洞におけるLDV 計測に関する検討”，機械学会年次大会講演論文集，（2003）

(25) たとえば，2004 年度機械学会流体工学部門講演会 EFD-WS（ダイナミック PIV による渦度場の時空間計測への挑戦） 講師：速水，岡本，豊田