空力音解析技術と新幹線への応用

1.空力音の基礎

図 1.1 と図 1.2 は 1963 年に登場した 0 系新幹線電車と 1998 年に作られた 700 系新幹線電車の写真です。0 系と 700 系ではスタイルが大きく異なっていますが、これは空気抵抗の低減といった古くからの技術課題を解決するためだけではなく、80 年代後半から特に注目されだした空力騒音の低減という新しい課題に対応するためのものです。

新幹線以外にも空力騒音の低減が要求されている製品は数多く、空調機、クリーナー、空冷コンピュータ、高速エレベータ、自動車の吸気マニューホールドなど様々な製品で空力騒音の低減が求められています。このテキストでは空力騒音の基礎を学ぶとともに、空力騒音の低減方法について「新幹線車両の低騒音化」の具体例を示しながら検討します。

図 2.1 0 系新幹線電車

図 2.2 700 系新幹線電車

1.1 基礎方程式

太鼓をたたいたり、ギターの弦を振動させると、その周囲の空気（媒体）が振動して音波が発生します。よく知られているように音波は縦波であり、媒体の疎密波として伝播し、標準状態では空気中を 340m/s の速さで伝わっていきます。

このように物体が振動することによって発生する音は直感的にも理解しやすいものだと思います。ところで、冬の寒い日に強い風がふいて電線などがゆれる場合に「ヒュー、ヒュー」という音がするのを聞いたことがあるかと思います。この音は電線がしっかりと固定され振動しないような場合にも発生します。また、ギリシャ神話には風が吹くとひとりでに鳴り出す小さな竪琴があるそうです。この楽器は風の神の名前をとり「エオルスの琴」という名で呼ばれています。

また、ジェット・エンジンから聞こえる轟音は空気の流れの中の渦の運動が原因と言われています。これらの流れによって発生する騒音の大きな特徴は音源が音を伝える媒質そのものであるということです。一般に上記の 3 つの音源（固体の振動、固体付近を流れが流れる場合、流体の運動そのもの）は、記述した順に音になる効率がいいので、音を伝える媒質そのものの運動から音が発生するという考え方はなかなか理解されなかったようです。

今日、空力音と呼ばれる流体力学的に発生する騒音について科学的なアプローチを行ったのはストローハル数で有名なストローハルであり、1878 年（以前）のことと言われています。ストローハル数は物体から発生する空力音（エオルス音）の周波数と風速の関係を調べるのに用いられています。また、1896 年には Rayleigh がエオルス音の発生に渦の不安定性が関係しており、物体の振動には無関係であるという考えを示しました。その後、多くの研究が行われましたが、なぜ、流れが物体の周りを流れるだけで音がでるのかは今世紀の半ばまでは厳密にはわかっていませんでした。

太鼓やギターの弦のように振動する物体がない場合に騒音が発生することを理論的（かつ数学的に厳密）に示したのは Sir James Lighthill です。1954 年のある日移動中の汽車の中で考えられたという Lighthill 方程式を以下に示します。

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2}{\partial x_j{}^2}\right)\rho = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} T_{ij} \tag{1.1}$$

ここで a は媒質の音速、ρ は媒質の密度、T_{ij} は Lighthill の音響テンソルといわれる項で、次式により表されます。

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + (p - a^2\rho)\delta_{ij} + \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \tag{1.2}$$

この式は流体の運動を記述する方程式である Navier-Storkes 方程式から直接導かれるものであり、N-S 方程式と同じ厳密さをもっています。Lighthill 方程式は形式的には音源項として Lighthill 音響テンソルを持つ波動方程式と考えることができます。Lighthill は固体が振動する場合の波動方程式と空力音による波動方程式を対比させることからこの方程式を導いたので、Lighthill の考え方を Lighthill の音響学的類推とよび、空力音の基本的な考え方となっています。

原理的には音響テンソル項を N-S 方程式から求め、波動方程式を解けば空力騒音を求めることが可能です。しかし、実際には音響テンソル項を計算したり、実験により求めることは非常に困難です。NS 方程式の一般解が得られないのと同様、Lighthill 方程式の一般解を直接求めることは特殊な場合を除いて不可能であることもわかっています。

基礎方程式が得られているのだから、数値計算による空力音の解析が可能なのではないかと疑問をもたれる方も多いと思います。コンピュータの飛躍的な性能向上に伴い、製品開発に流体解析が一般的に用いられるようになった今日、空力音の数値解析も同じように可能であはないかと考えるかたも多いでしょう。しかし、実際には Lighthill 方程式を直接計算し、空力音を求めることは現在のコンピュータの能力をもってしても容易なことでは有りません。もちろん、空力音の数値解析は 10 年前に比べ飛躍的に向上しており、近い将来、空力音解析による設計の最適化が可能になると思われますが、それまでの間、実験や基礎的な数値解析を用いた開発を行う必要があります。

Lighthill 方程式は波動方程式の右辺に流れに関するすべての項を埋め込んでいるので、流れの乱れにより音が発生することを漠然と述べたものであるとの批判もあります。Lighthill 方程式によれば、水飴が流れる場合も音が出るのです。

したがって、数値解析や基礎実験などを用いて Lighthill 方程式そのものを解くような場合をのぞき、製品開発等で Lighthill 方程式を直接使うことは少ないと思います。

では、この式は無用なものなのでしょうか？そんなことはありません Lighthill 方程式は実際の設計等にも非常に役立つ有用なものです。それは Lighthill 方程式を適当な条件の元に解くことにより、有用な物理的知見が得られるからです。

Lighthill は Lighthill 方程式を用いてジェット・エンジンから発生する騒音が速度の 8 乗に比例することを示し、その結果からジェット騒音を低減するにはジェットエンジンの吹き出し口を大きくし、平均流速を下げる（流量は変わらない）ことが本質的に重要であるとの知見を得ました。この結果、初期に開発されたターボ・ジェットエンジンを大口径のターボファン・エンジンにかえるなど工学的な面でも画期的な貢献をしています。

1）流速が非常に小さい場合：
空力音は速度の 4 乗に比例する。

2）流速が音速に比べて小さな流れ場の中に物体がある場合：
空力音は速度の 6 乗に比例する。

3）流速が音速と同程度の場合：
空力音は速度の 8 乗に比例する。

1）から 3）は音源の指向特性からそれぞれ単極子（monopole）, 双極子（dipole）, 四重極子（quadorpole）ともいわれます。それぞれの音源は流速の大小に関わらず同時に存在しますが、それぞれマッハ数 M の 1 乗、3 乗、5 乗に比例するため、マッハ数の大きさによってどの音源が支配的になるかが決まってきます。（もちろん、双極子音源は物体が流れ場の中にあることが必要です）。

例：

単極子　：拍手をした場合などの湧き出しや吸い込み流れによって発生する
双極子　：新幹線のパンタグラフなどから発生する騒音
四重極子：ジェット・エンジンンの噴射音

日立製作所で扱う製品では双極子音源が比較的多いと思われますので、本書では双極子音源について検討します。なお、マッハ数は 0.01 程度から 0.3 以下（風速 3m/s 程度から 100m/s 程度）を対象とします。

1.2 円柱から発生する空力騒音

マッハ数が小さな流れ場に物体が置かれた場合には Lighthill 方程式は以下のように表わせることが Curle によって示されました。

$$\overline{p^2(x)} = \frac{x_i x_j}{16\pi^2 a^2 x^4} L \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\frac{\partial f_i(z)}{\partial t} \frac{\partial f_j(z+\zeta)}{\partial t}} d\zeta \qquad (1.3)$$

ここでζは円柱スパン方向の 2 点間の距離を表わします。レイノルズ数が大きい場合、円柱後流はスパン方向に完全に二次元ではなく、三次元性を持っているので、スパン方向に離れた位置における流体力の相互相関は小さくなると考えられます。したがって、流体力のスパン方向相関長を求め、流体力が等価的に同位相で働く領域を推定する必要があります。

Phillips 及び神部はスパン方向の相関長さを Lc として式(1.3)を変形し、以下の式を導きました。

$$\overline{p^2(x)} = \frac{1}{16\pi^2 a^2 x^4} L L_c \overline{\left(x_i \frac{\partial f_i}{\partial t} \right)^2} \qquad (1.4)$$

この式から流れの中に物体が置かれた場合、物体に働く流体力の時間変化を物体表面で積分したものが空力音になることがわかります。単位長さ当たりの流体力 f_i を円柱周方向の

微少長さに働く表面圧力変動 P を用いて表わせば,

$$f_i = \int_0^{2\pi} n_i P \frac{D}{2} d\theta \tag{1.5}$$

となりますから、空力音（エオルス音）が物体表面の圧力変動に起因することがわかります。

<u>演習 1.1</u>：いま、円柱に働く流体力が

$$f_i = C_L \frac{1}{2} \rho U^2 D \sin(\varpi t)$$

で表わされるとする。円柱の真横で音を観測する（x_i=r とする）場合、音圧はどのような式で表わされるか？ ここでストローハル数 S_t を

$$St = \frac{fD}{U}$$

とする。

(1.6)

有名な 6 乗則が導けたでしょうか？

この式には空力音を考える上で重要ないくつかの考え方が含まれています。

すなわち、

空力音は速度の 6 乗に比例する。

物体の代表長さの 2 乗に比例する。

音源と観測点の距離の-2 乗に比例する。

ストローハル数、揚力係数の関数であり、これらは一般にレイノルズ数の関数である。

最後のレイノルズ数に依存する項は重要であり、この項が一定であれば、あるいは一定の条件を作れば、空力音の相似則が作れるので、実験や製品開発を行う際に重要なパラメータとなります。また、揚力係数は流れの乱れにも依存するので、乱れ強度が変化すると空力音が変化することも示しています。図 1.3 は流速に対して空力音が速度の 6 乗に比例することを示した実験結果です。

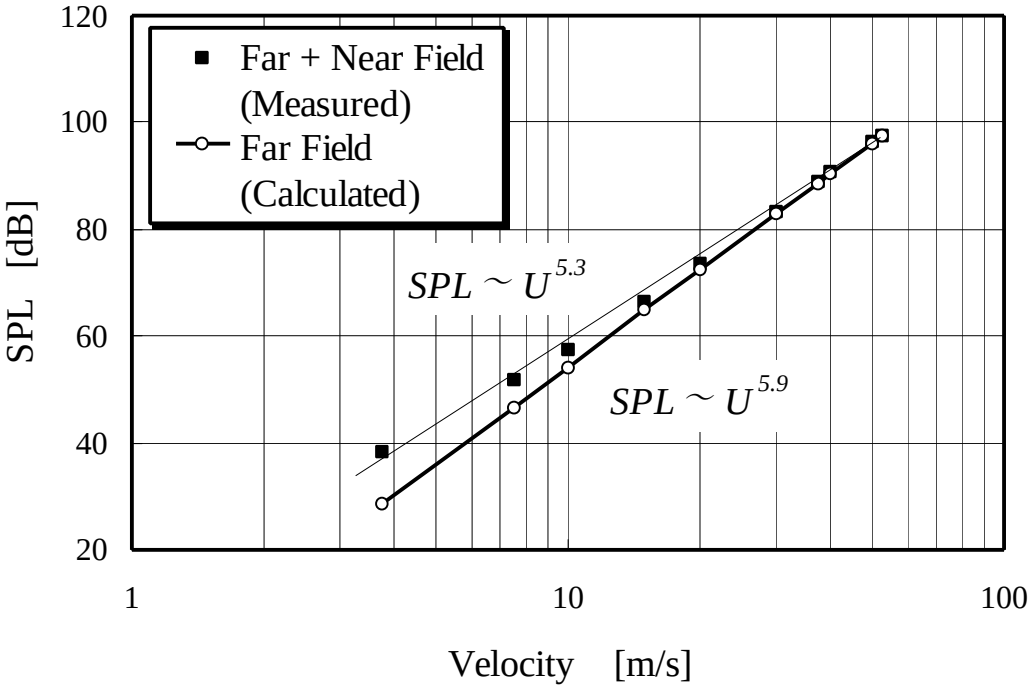


図 1.3　円柱から発生する空力音レベル

1.3 Curle の理論に基づく計算例

実際に Curle の理論を用いて空力音がどの程度計算できるかを次に示します。

風洞中に直径 40mm、長さ 500mm の円柱を設置し、空力音を測定します（図 1.4）。この円柱内部には図 1.5 に示すようにマイクロフォンが埋め込んであり、円柱表面の圧力を計測することができます。円柱表面の圧力変動の測定結果を式(1.5)に代入し、円柱に働く流体力を求めます。空力音を計算した結果とマイクロフォンで直接測定した結果を図 1.6 及び表 1.1 に示します。

Curle の理論を用いて空力音を正確に計算できることがわかります。また、図 1.7 は同様な計算を数値解析で行った場合の結果です。円柱のような基本的な形状の場合、空力音を数値解析によって直接求めることができることがわかります。（詳細は添付した文献を参照）

図 1.8 は円柱表面の圧力変動スペクトルです。カルマン渦の基本周波数(fD/U=0.2)の成分が卓越していることがわかります。図 1.9 は表面圧力変動の構造を示したものです。無次元周波数 0.2, 0.4, 0.6（カルマン渦の基本周波数とその高調波成分）に対応する周波数成分が他の成分よりも卓越していることがわかります。空力音の特性の一つとして大規模で構造的（位相のそろった）な渦から大きな空力音が発生します。円柱のエオルス音の場合、カルマン渦とその高調波成分は位相のそろった渦を形成するので大きな騒音源となります。

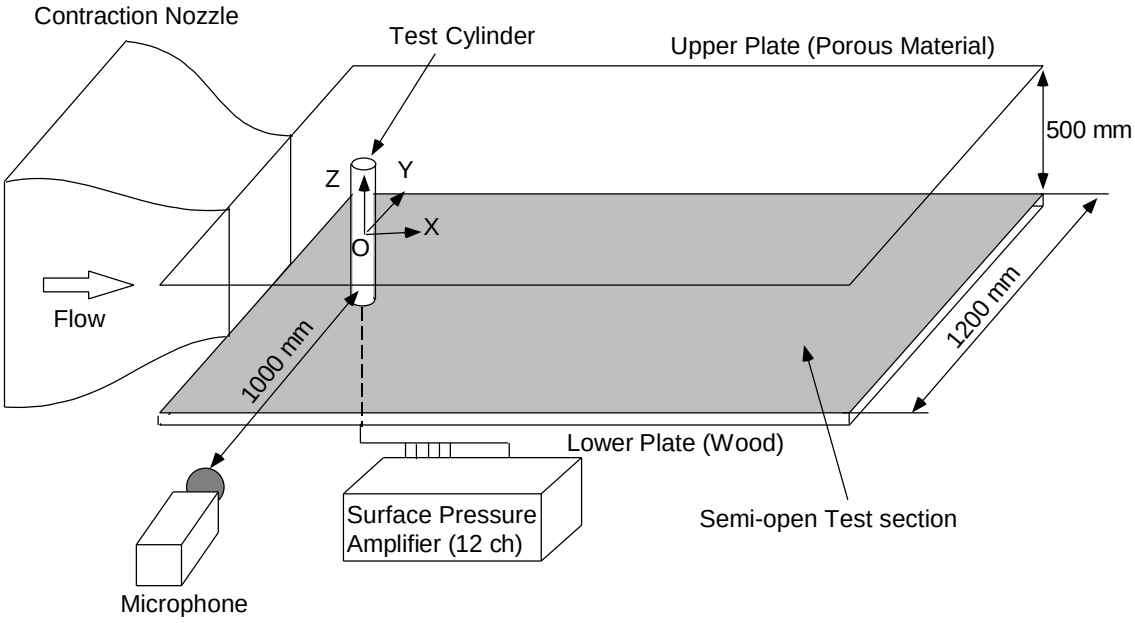


図 1.4　空力音測定のブロックダイアグラム

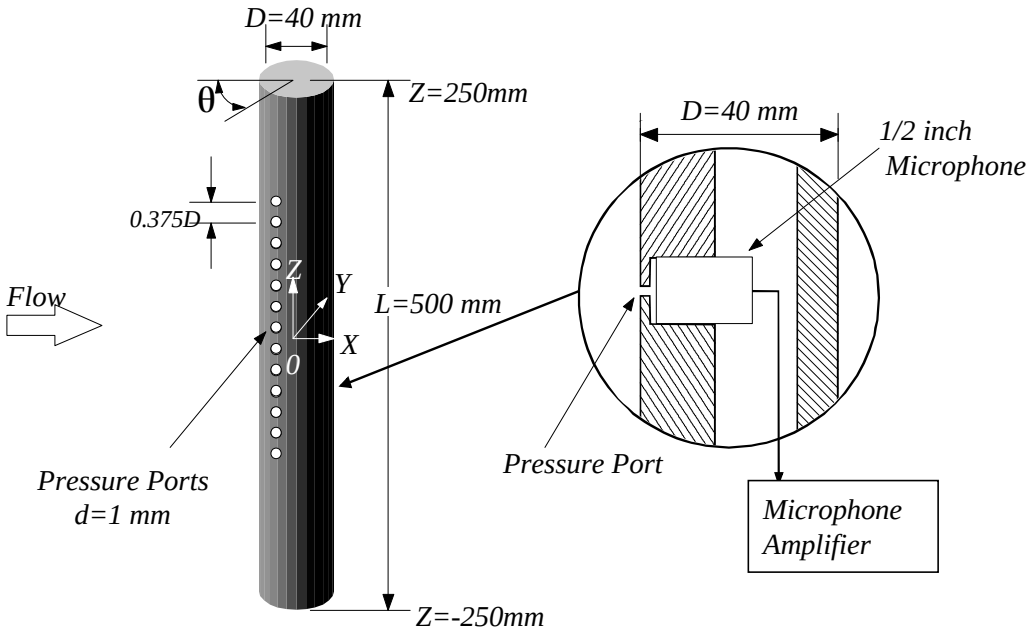


図 1.5　　試験円柱（D=40㎜）

表 1.1　空力音の予測結果

レイノルズ数	実測値	計算結果
1.0×10^4	28.7	29.4
2.0×10^4	46.8	46.5
4.0×10^4	64.8	64.1
1.0×10^5	88.6	88.5
1.4×10^5	97.4	96.5

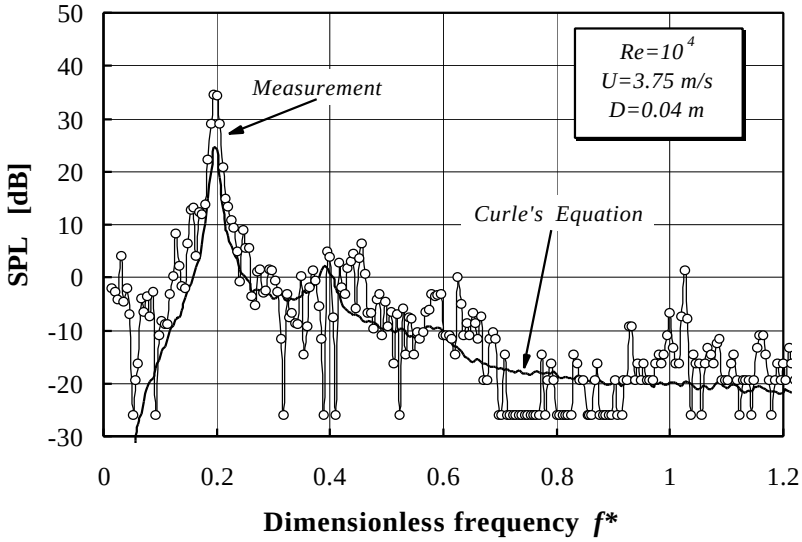


図 1.6(a)　空力音スペクトルの計算結果

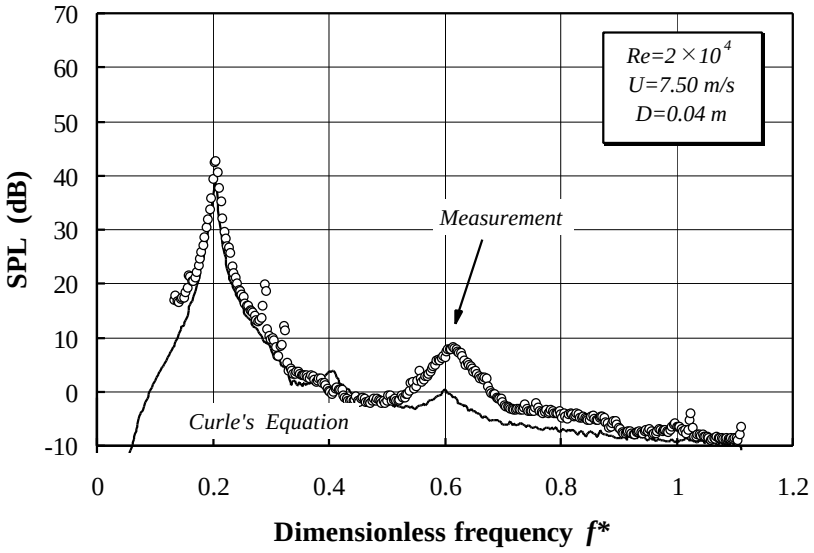


図 1.6(b)　空力音スペクトルの計算結果

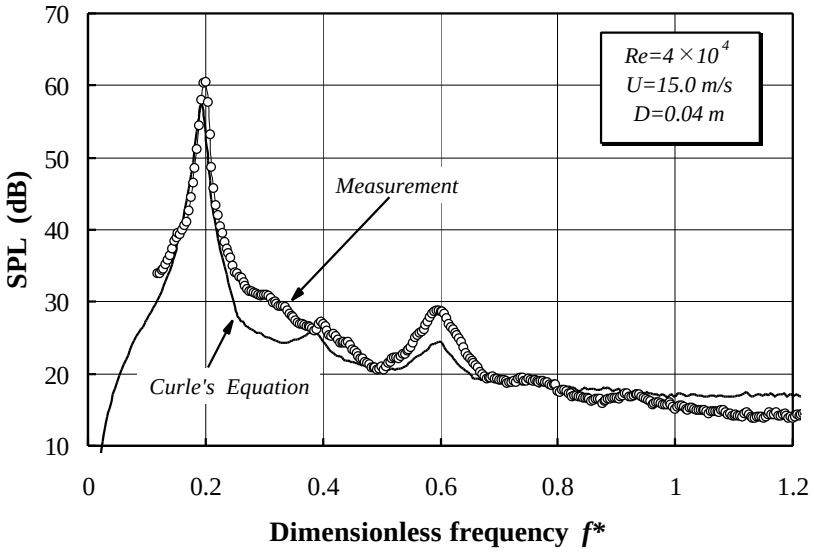


図 1.6(c) 空力音スペクトルの計算結果

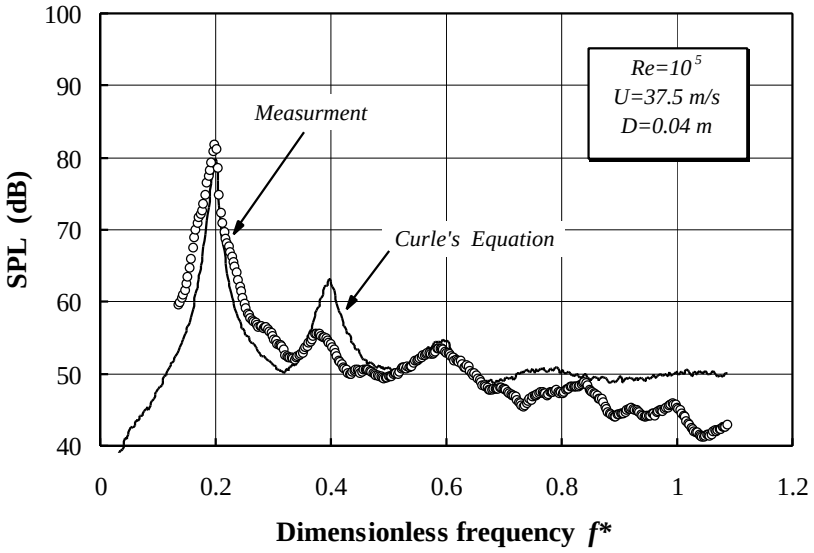


図 1.6(d) 空力音スペクトルの計算結果

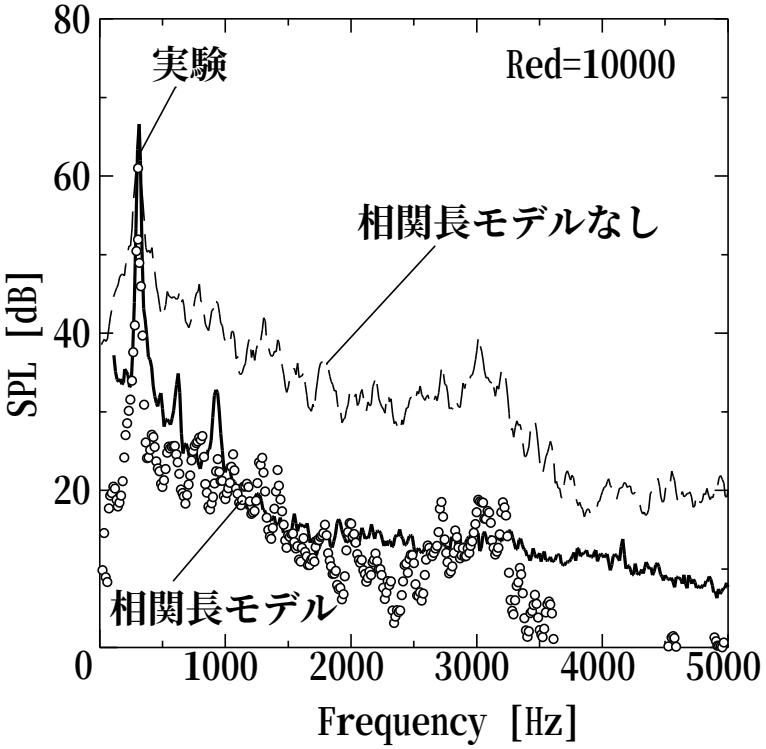


図 1.7　空力音の数値解析結果

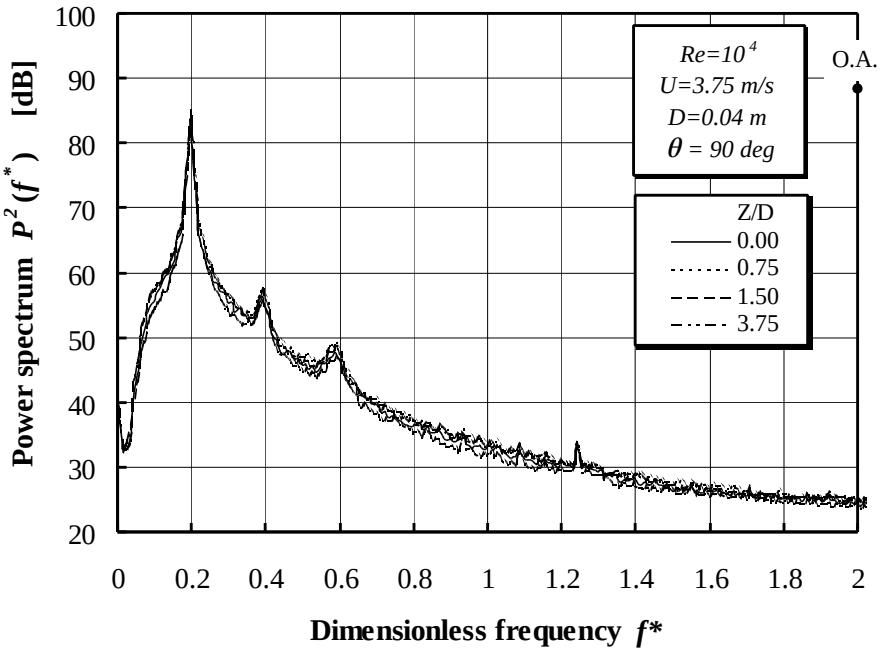


図 1.8 表面圧力変動スペクトル（Re=10^4 ,θ=90°）

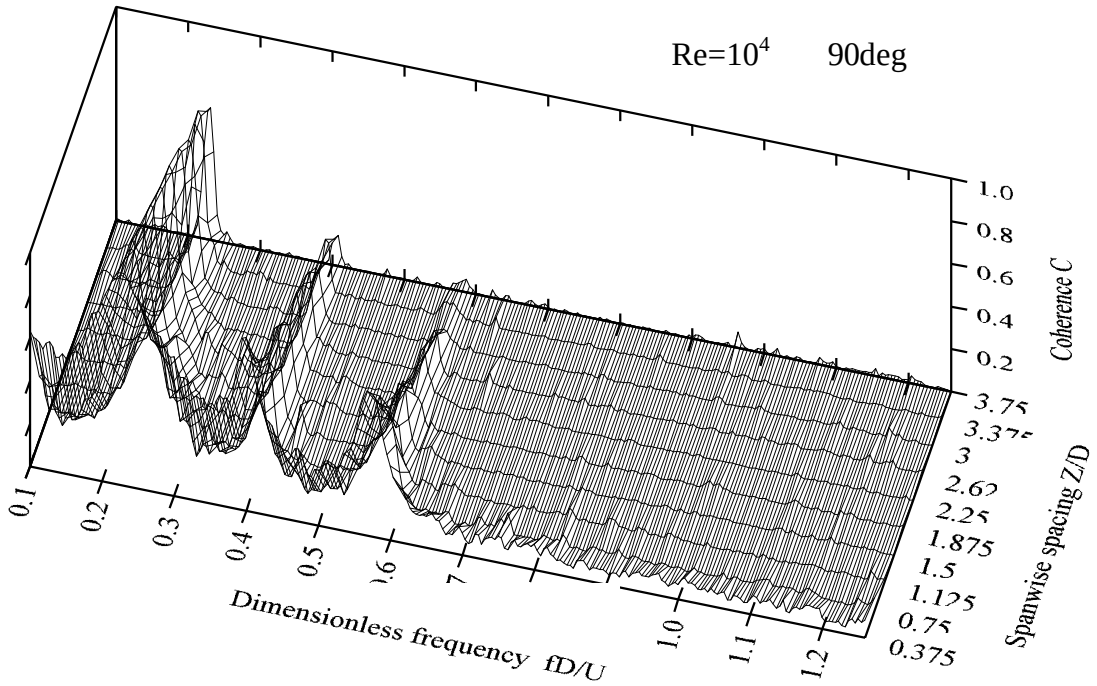


図 1.9　表面圧力変動のスパン方向コヒーレンス

<u>演習 1.2</u>：演習 1.1 で得られた式を対数で表わし、各項の意味を考えよ

<u>演習 1.3</u>：平均風速 50m/s の流れの中に直径 5cm の円柱がおかれている。
発生する空力音の基本周波数を求めよ。また、直径 3cm の角柱が置かれた場合の周波数を求めよ

2.空力音の計測手法

開発した製品の性能を正しく評価し、性能を向上させるための知見を得るためには空力音を測定する技術が必要になります。この章では空力音の測定方法について説明します。

2.1 風洞

航空機や自動車の空気抵抗を低減するため、古くから風洞と言われる風を作る装置が使われてきました。一般に風洞はファンによって作られた流れを測定部に送り込み、モデル周囲の流れを可視化したり、速度分布を測定するのに用いられます。風洞を使うことの利点は風速等の流れの状態を制御することや繰り返し実験が可能なため、製品等を直接測定する場合に比べ、測定が簡単になることがあげられます。ただし、風洞試験は数値解析と同様、現象をモデル化したものですから、測定データを解釈する際は現実とモデルとの違い等を常に考える必要があります。

空力音の測定には一般に低騒音風洞、無音風洞と呼ばれる特別な吸音処理をした風洞が使われます。図 2.1 は日立製作所機械研究所所有の低騒音風洞です。測定部の大きさは 500㎜×500㎜ で主に流れ場を測定するための低速測定部と音の測定を行う高速測定部から構成されます。2 つの測定部は半無響室（音が反射しないように壁を吸音処理した部屋）に設置され、空力音の測定が精密に行えるようになっています（暗騒音 25dB）。

風洞の騒音源であるファンの騒音はサイレンサと吸音パネル、曲がりダクトを用いて減音されます。ファン室内の騒音は 120dB にもなりますが、測定部の騒音レベルは 40dB 以下です。

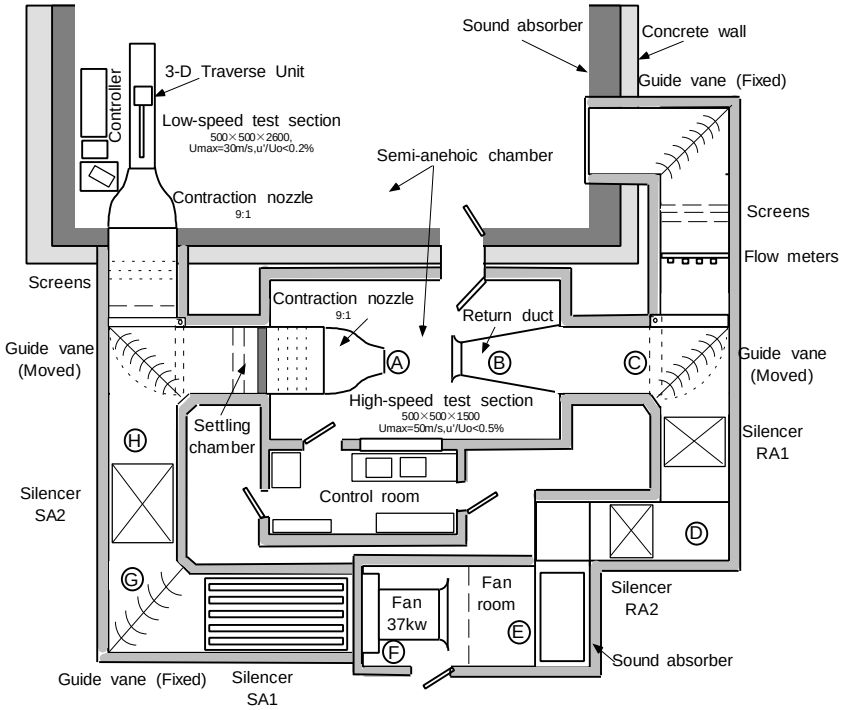


図 2.1 低騒音風洞

図 2.2 に示すように気流の速度が 50m/s の場合、騒音レベルは 60dB 程度ですから、大型の台風と同等の風がながれているわきで電話がかけられます。このような風洞は国内では日産自動車、荏原製作所、川崎重工、三菱重工業、JR 総研、日大、東工大などにあります。JR 鉄道総研の米原風洞センターの風洞は時速 450km/h までの試験が可能です。

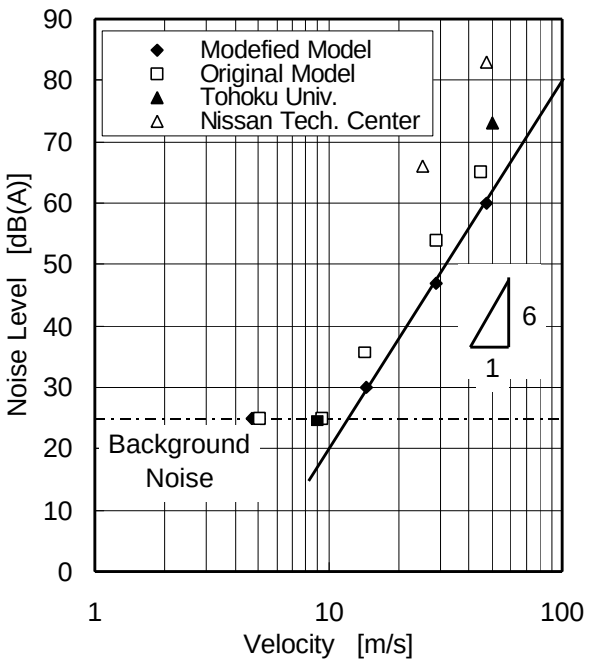


図 2.2 風洞の騒音レベル

2.2 流速計

流れ場の測定にはピトー管、熱線流速計、レーザー・ドップラー流速計などが使われます。

ピトー管は原理が非常に簡単で、取り扱いが容易なため、流れ場の基本的な性質を調べるのに適しています。

流れに方向性がある場合には 3 孔や 5 孔のピトー管が使われこともあります。

熱線流速計(図 2.3)は加熱した金属細線を気流中に挿入して流速を測定するセンサです。気流によって細線が冷却されるため、金属細線の電気抵抗が変化します。熱線流速計ではこの電気抵抗の変化と流速の関係をあらかじめ調べておき、流速を求めます。

実際の回路では細線の温度が常に一定になるようにフィードバック回路が構成されており、流速が高くなり、金属細線が冷却されるとより多くの電流を流すようになっています。この電流を増幅することにより、流速の瞬間的な変化を捕らえることができます。

熱線流速計では２ kHz～10KHz 程度の速度変動の測定も可能なので、乱れのスペクトルを調べることも可能です。

熱線流速計の問題点は流れ場にプローブを挿入するため場を乱すこと、間接的な測定なので、校正が必ず必要なこと。逆流の検出ができないなどがあげられます。

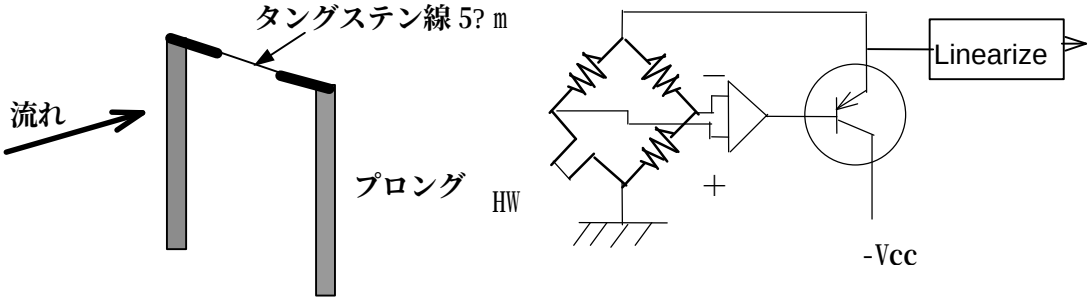


図 2.3 熱線流速計

レーザー・ドップラー流速計はレーザー光をビームスプリッターにより分光し、適当な角度でそれらを交差させ、焦点を結びます。交差体積には規則正しい明暗が表れますが、この部分を粒子が通過すると反射光による明暗が生じます。この明暗の周期を計測することにより流速を求めます。レーザー流速計は非接触で流れを計測できるという利点がありますが、周波数分解能は熱線に比べ劣るため、空力音の計測ではあまり一般的ではありません。

2.3 圧力計測

空力音の場合、物体表面の圧力計測が重要です。もっとも簡単な圧力計測は物体の表面に小さな孔をあけ、導圧管を用いて圧力センサと連結するものです。図 1.5 に示した円柱の場合は、圧力孔の大きさが直径 1㎜,導圧管の長さが 3㎜,圧力センサにマイクロフォンを用いています。マイクロフォンを用いた圧力計測は非常に微少な圧力変動を精度良く測定できますが、直流成分の測定ができないという欠点があります。

圧力センサの大きさが圧力孔に比べて大きいので、共鳴現象が生じて周波数分解能が低下します。これは圧力タップを用いた圧力測定に共通した問題ですので、圧力変動を測定する際は測定系の動特性を調べておく必要があります。図 1.5 に示した測定系の場合(詳細は図 2.4 参照)、共振周波数は次の式で求めることができます。

$$fr = \frac{a}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{V(\delta + m)}} \tag{2.1}$$

ここでVは受圧面前面の空洞体積、S は圧力口の面積、dは圧力口の長さ、aは音速、m は管端補正係数（圧力口の直径の 0.8 倍）です。図 2.5 の測定系の場合、共振周波数 f_rは 1380 Hz となります。この測定系の応答特性は共振周波数 f_rを用いて

$$G = 20\log\frac{1}{\sqrt{1-\left[(f\ /\ f_r)^2\right]+(2\xi f\ /\ f_r)^2}} \tag{2.2}$$

$$\phi = \tan^{-1}\frac{2\xi(f/f_r)}{1-(f/f_r)^2} \tag{2.3}$$

とあらわされます。図 2.5,2.6 は圧力センサの動特性の測定例です。

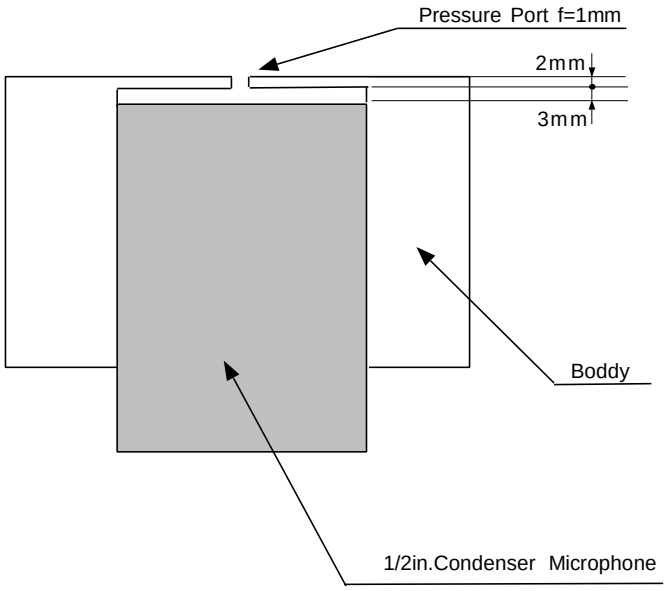


図 2.4 表面圧力センサの構造

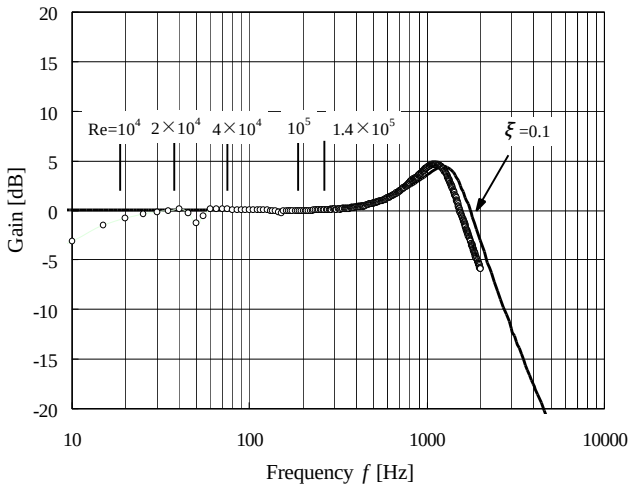


図 2.5　表面圧力センサの周波数特性（ゲイン）

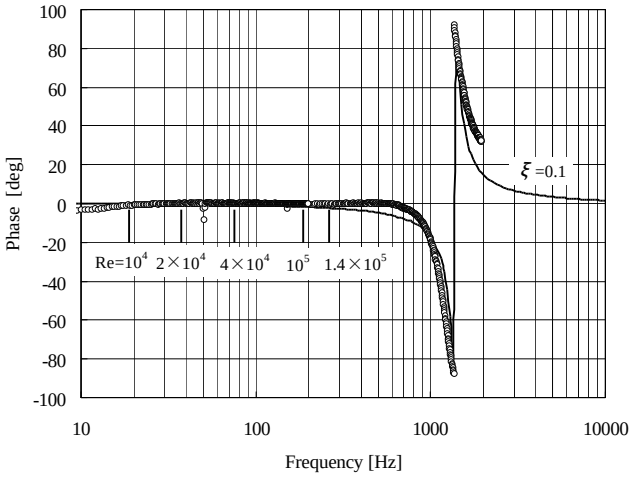


図 2.6 表面圧力センサの周波数特性（位相）

2.4 流れの可視化

流れの中に煙やタフトを入れて流れ場全体の様子を調べることにより、流れ場の大まかな構造をつかむことができます。現在では画像処理技術と組み合わせて定量的な計測を行うことも可能になってきています。可視化によって得られる画像は必ずしも正しい情報を与えるとは限らない（煙が渦をまいているからといってそこに必ずしも渦があるわけではない）ので、流れ場を解釈する場合は慎重な対応が必要ですが、比較的手軽に流れの様子を調べることが可能なので、実験の初期段階で、計測ポイントを決定するための基礎実験として可視化を行うことを推奨します。

ここではスモーク・ワイヤ法による可視化写真を示します。

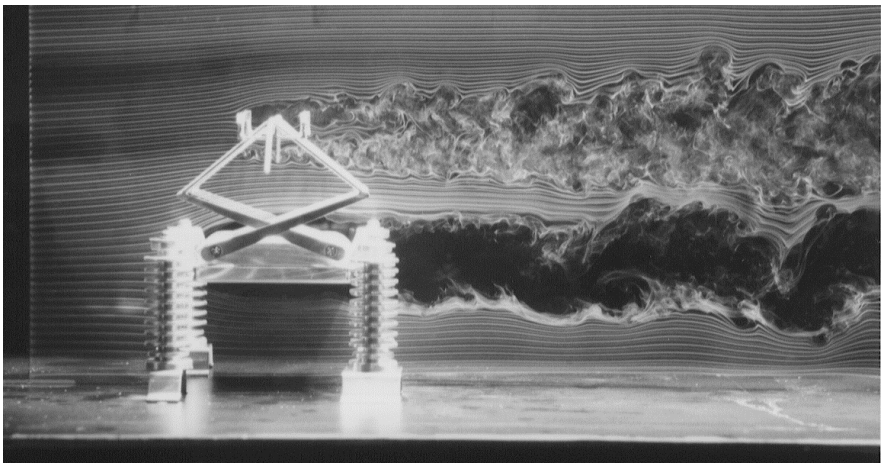


図 2.7 スモークワイヤ法による可視化

2.5 騒音測定

音の測定には精密騒音計や普通騒音計が使用されます。マイクのサイズは直径 1 in 及び 1/2in のものが一般的です。周波数範囲は 20Hz～12.5KHz（または 20Hz～20KHz）です。
音圧の単位は Pa ですが、50dB とか、62dB などのように dB で表示するのが一般的です。
dB は基準音圧に対する対数表示を 10 倍したものです。音圧レベル SPL は以下のように表わされます。

$$SPL = 10 * \log\left(\frac{P^2}{P_o{}^2}\right) = 20 * \log\left(\frac{P}{P_o}\right) \qquad (2.4)$$

ここで P_o は基準圧力で 2×10^{-5}Pa です。

騒音計で音の測定をする場合、1Pa=94dB として校正することが多く、ピストンホンと呼ばれる校正装置を使って校正するのが一般的です。

騒音計には校正信号を出力するタイプのものもありますが、できるだけピストンホンを用いて校正し、騒音計の校正出力と大幅に異なる場合はメーカーに出して校正する必要があります。

周波数特性：

音や音波は人間の感覚とは無関係に定義できる物理量ですが、騒音は人間が不快と感じる音のことですから、人間の感覚、あるいは耳の生理的な構造に依存するものです。人間の感覚までを含めた騒音の評価方法についていろいろと研究されていますが、一般には音圧測定結果に対して人間の聴感補正を行ったものを騒音レベルと呼んでいます。

騒音計には A 特性補正というフィルタがついていますので、騒音レベルを測定する場合は、A 特性フィルタを ON にします。A 特性補正は図 2.8 に示すように人間の耳の感度が敏感な 1KHz 付近を中心に低周波数や高周波数での音の特性を補正したものです。

このように音の測定では周波数が問題となることが多いので、FFT アナライザやオクターブ分析器を用いて周波数解析を行うことが一般的です。

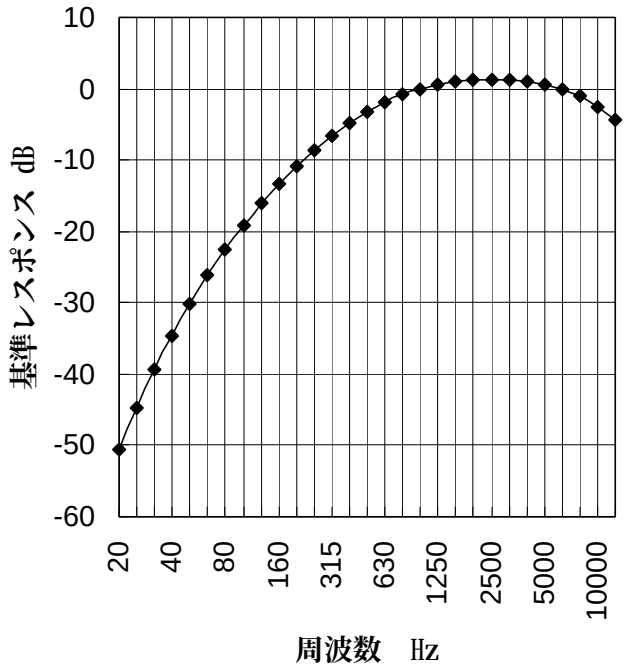
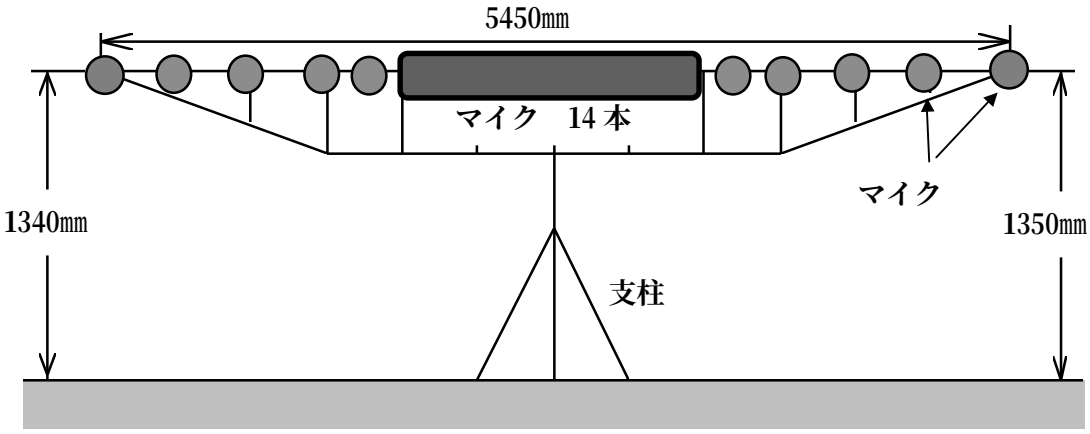


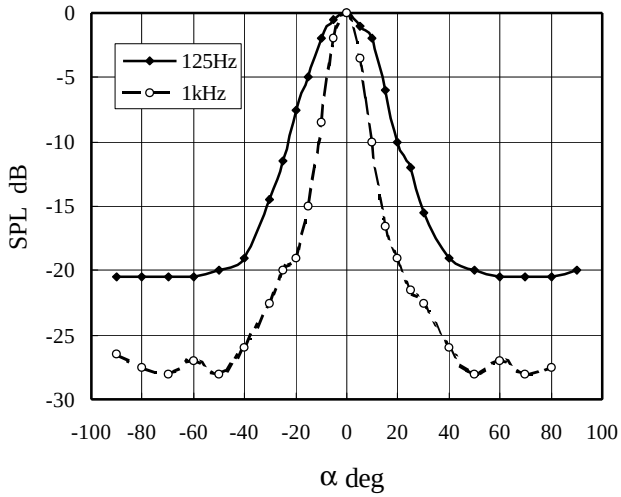
図 2.8　A特性補正

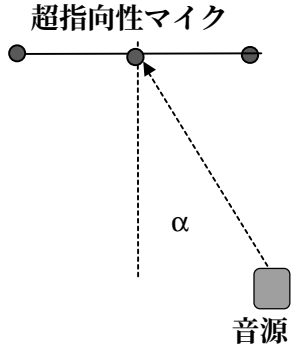
2.6 超指向性マイク

市販されている騒音計は一般に無指向性なので、騒音源を詳細に探査したい場合などはパラボラ・マイクやアレイマイクなどの指向性マイクロフォンが使われます。図2.9～10に超指向性マイクを示すします。



(a) 装置外観　(正面図)





平面図

(b) 指向特性測定結果 (125Hz及び1kHz)

αは超指向性マイク中心と音源のなす角

仕様と性能

マイクロフォン		1/2エレクトリックコンデンサ　UC-52型　24本
フィルタ		1/1オクターブバンドパスフィルタ JIS2型
中心周波数		125,250,500,1000,2000,4000Hz 6バンド
-10dB指向角	125Hz	20 °
	250Hz～4kHz	10 °

図2.9 超指向性マイク

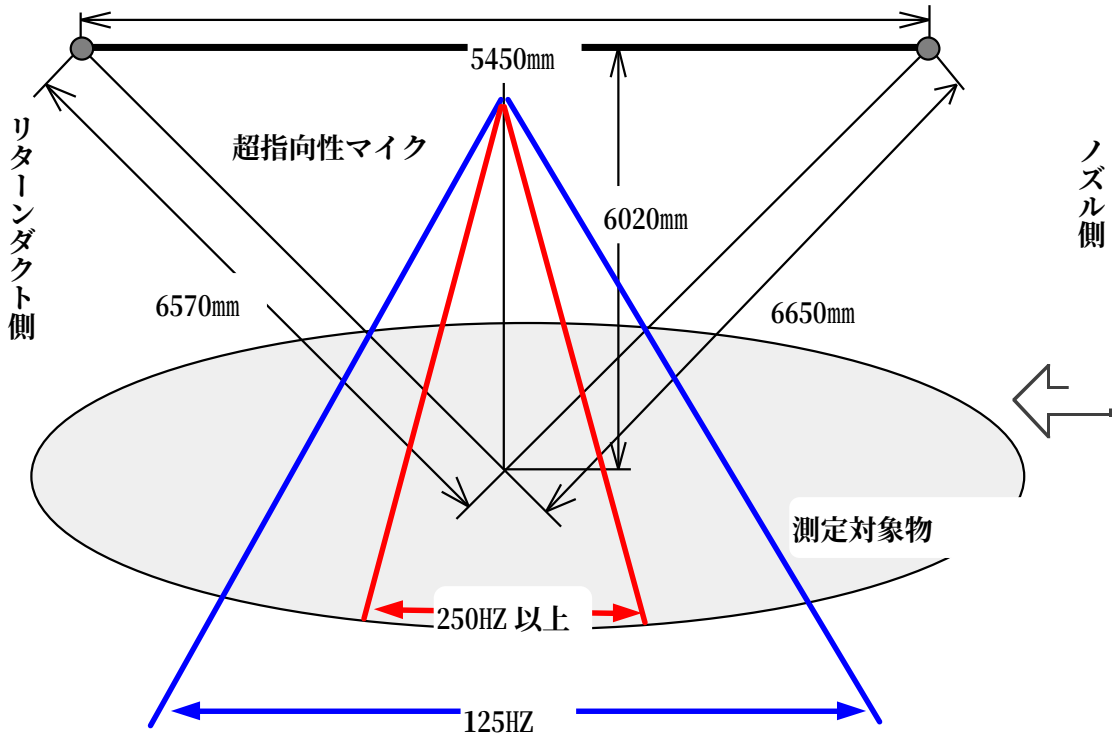


図 2.10　超指向性マイクの指向特性

3.新幹線の低騒音化

新幹線の車外騒音は、220km/h 以上の高速走行時には空力音、特にパンタグラフから発生する空力音が支配的であるといわれています。このため、パンタグラフから発生する空力音の低減が高速車両の低騒音化における必須の技術課題となっています。そこで風洞実験が必要になります。風洞では小型の模型を使って実験を行うので、スケールモデルを用いて実機から発生する空力騒音を推定する方法について示します。

3.1 パンタグラフから発生する空力騒音

図 3.1 にパンタグラフ周囲の流れの可視化写真を示します。架線から電気を集電するための舟体(Collector)により、カルマン渦のような大きな渦が作られていることがわかります。パンタグラフからの騒音はこの舟体からの騒音と絶縁のための碍子からの騒音が支配的です。舟体（角柱）および碍子(円柱)から発生する空力騒音の基本周波数の**ストローハル数**はそれぞれ 0.13，0.2 であり、パンタグラフから発生する空力騒音が、カルマン渦によるものであることがわかります。

カルマン渦から発生する双極子音は**流速の６乗に比例**するため、騒音を低減するために

は、舟体と碍子周囲の流れを低減することが効果的です。しかし、新幹線の架線電位は25000 ボルトのため、車体との絶縁を図るためには、30cm 以上の空気絶縁距離が必要です。このため、パンタグラフカバーとパンタグラフの間に大きな空隙を設けなくてはならなくなり、この部分から大きな空力音が発生します。

3.2 実験方法

実験には風速 50m/s 時の暗騒音レベルが 60dB 以下の低騒音風洞を使用しました。測定部は 500mm×500mm の断面を有する 3/4 オープンチャンネル型です。このテストセクションに、スケールモデル(1/15～1/6)を設置し、モデル側方 1m の位置で騒音を測定を行います。

実物大スケールの風洞実験には日産自動車株式会社テクニカルセンターの大型風洞を利用しました。超指向性マイクと無指向性マイクをモデルの側方 6m の位置に設置し、空力騒音の測定を行います。測定対象は 100Hz 以上とし、スケールモデル、実機モデルとも上記測定位置で測定した場合、遠距離場と見なせます。

次にスケールモデルの風洞実験結果から実機スケールの空力音を推定する方法を示します。Curle の式から物体から発生する空力騒音は、

とあらわせます。ここで A は物性値に関する比例乗数、U は速度、r は測定位置、d は物体の代表長さ、S はストローハル数です。また $f(\mathrm{Re})$ は流体力の実効値（C_{Lrms}）の 2 乗と渦スケール（?）の積であり、レイノルズ数に依存します。この項は C_{Lrms} の変化に強く依存するため、C_{Lrms} の変化が小さければ、第 5 項のレイノルズ数依存性は小さいと考えられます。本研究で取り扱うカバー周りの大規模なはく離ではレイノルズ数の依存性は比較的小さいと考え、第 5 項を一定と見なして、スケールモデルの測定結果から実機レベルを推定しました。

周波数に関しては、ストローハル数一定を仮定し、

$$f = f_m \frac{D_m}{D} \frac{U}{U_m} \qquad (3.1)$$

として、実機の周波数を推定します。ここで添え字 m はスケールモデルの値を示します。工学的な騒音問題では、周波数を 1/3 オクターブバンドで議論することが多いため、上記仮定からの推定でも実用上は問題がないと思われます。

スケールモデルから実機スケールの空力音スペクトルを予測した後、JIS C1505-1988 標準入射角レスポンスに準じて、人間の聴感補正(A 特性補正)を行い、騒音レベルを求めました。

図 3.2 に 1/6,1/15,1/0,1/1 パンタグラフの空力騒音の比較結果を示します。スケール

モデルによる測定結果と実機モデルの騒音レベルは比較的よく一致することがわかります。

ただし、本手法による空力騒音の先にあげたレイノルズ数のほかに、以下の問題があります。

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。周波数は物体の代表寸法と速度の関数ですが、式 3.1 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ます。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くなります。この問題は特に低周波数で顕著になります。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、レベルが小さくなりますので、全体騒音レベルへの寄与が小さいと考えられます。

本研究で示した手法は**近似的**なものですが、比較的低コストの風洞実験により、試作モデルの実機騒音レベルを大まかに推定し、モデルの良否を検討することが可能であり、製品開発を進める上では有効と考えられます。ただし、細かなディテールの違いや空力-音響の連成問題などが問題となるケースでは、モデル試験だけでは不十分であり、大型風洞試験および数値解析を並行して行う必要があります。

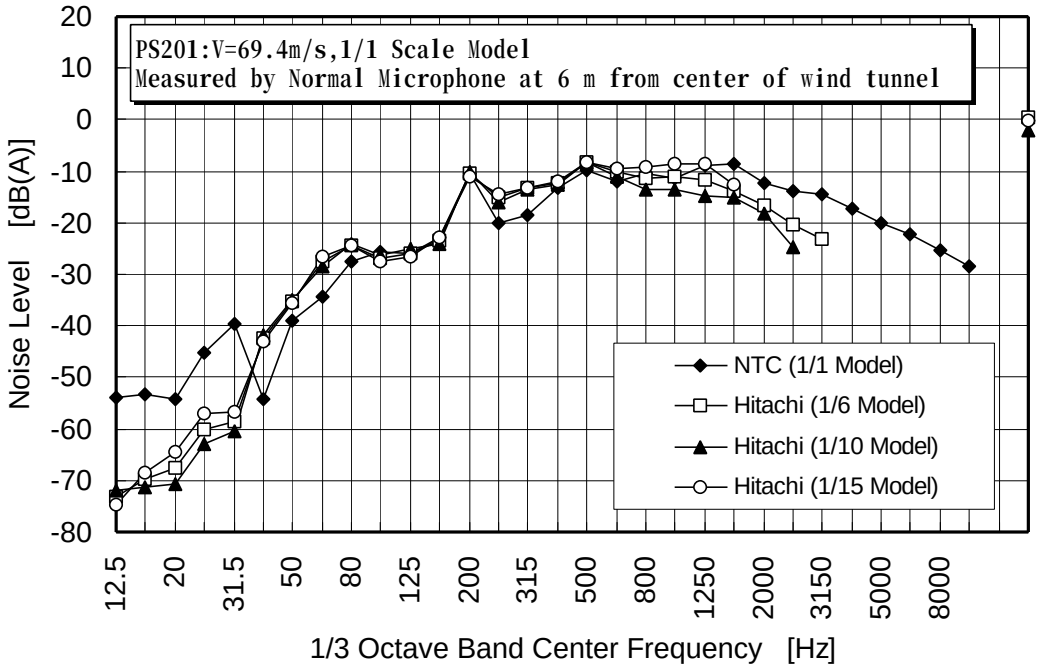


図 3.2 風洞実験による騒音測定結果の比較

演習 3.1 :
1/5 スケールモデルを用いて、風速 50m/s で風洞実験を行ったところ基本周波数 5000Hz、騒音レベル 80dB であった（測定位置は 5m）。実機の速度が 100m/s、騒音評価位置が 25m 点の時の騒音レベルを推定してください。

演習 3.2 :
カー・ラジオ用のアンテナから大きな空力音が発生するため、これを対策しなければならなくなった。アンテナをテーパー状にしたところピーク音がさがることがわかった。この原因について検討してください。また、ほかにどのような対策案があるか検討してください。

3.5 まとめ

低騒音パンタグラフの開発について簡単に紹介しました。文中に本講義でお話したいくつかのキーワードを太字（空力音の 6 乗則、ストローハル数、渦のスケール）で示しました。

Curle の理論や Lighthill 方程式を実験で直接測定することは難しい面もあります。近い将来、これらの方程式を直接数値解析することも可能かと思いますが、当面は実験と計算を進めていく必要があります。本報告で紹介したのは空力音の基本的な事項だけですので、研究に役立てるには、様々な工夫や知識、経験が必要かと思いますが、本講義で取り上げたいくつかの基本的な事項を参考に空力音に関する知見を深めください。

参考文献：

流体力学、乱流基礎一般：

[1] Hinze, J.O. “Turbulence,2nd ed”, McGraw-Hill (1975)
[2] Schlichting, “Boundary Layer Theory, 7th ed”, McGraw-Hill (1979)
[3] **谷一郎 「流れ学」**
[4] **谷一郎（偏）「流体力学の進歩（乱流）」,丸善** (1980)
[5] **巽友正（偏）「乱流現象の科学」、東京大学出版** (1986)

流体音に関する参考書

[1] **梅沢清彦（偏）「静粛工学」、開発社** (1995)
[2] **望月 , 丸田「流体音工学入門」、朝倉書店（1996）**