エオルス音の予測に関する研究*

(断面形状が発生音に及ぼす影響)

青 木 誠^{*1}, 石 原 国 彦^{*1}

Study on Prediction of Aerodynamic Sound Radiated from Various Cylinders (Effect of Cross-Section on Aeolian Tones)

Makoto AOKI and Kunihiko ISHIHARA^{*2}^{*2} Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Akashi Technical Institute,
1-1, Kawasaki-cho, Akashi, 673-8666 Japan

The aerodynamic sound generated from cylinders with three different cross-sections (●, ■, ◆) at Reynolds number of 20 000 are predicted by use of acoustic analogy method that is based on Curle's equation. In this study, the sound source is evaluated by the two-dimensional CFD technique are the correlation length obtained by the experiment. As a result, the predicted values of sound pressure are in reasonable agreement with the experimental ones. However, the relative comparison of the aerodynamic sound due to the various cross-sections can't be discussed by this method.

Key Words: Aerodynamic Acoustics, Computational Fluid Dynamics, Flow Measurement, Vortex, Wake, Prediction, Cylinders, Cross-Section

1. 緒 言

今や機械の静粛性は時代の要請であり、環境問題への配慮や製品の差別化の観点から、低騒音化設計はメーカーにとって重要な課題である。例えば、新幹線に代表される輸送機械の高速化は必然的に流体騒音の問題を提起し⁽¹⁾、その低減化が高速化の重要な鍵となっている。その他、航空機⁽²⁾やファンなどの流体機械⁽³⁾においても流体騒音は問題となっており、その低減化に対するニーズは近年非常に高い。

低騒音化の最も効率的な方法は音源そのものを抑制することであり、流体騒音の場合は物体形状の変更によってそれが可能となる。したがって、物体形状と発生音の関係を明らかにする技術、すなわち流体騒音を予測する技術の構築は重要な研究課題と位置づけられよう。

本研究では、上述の様な認識に基づき、最も基本となる柱状物体から発生する流体騒音（以下、エオルス音と称す）を採り挙げ、精度の良い合理的な騒音予測法の開発を目的とする。

エオルス音に関する研究は過去に数多く行われているが、その殆どは実験によるものであった⁽⁴⁾。しかし、近年では CFD 解析技術および計算機演算能力の向上

も相俟って、数値解析に基づくエオルス音の研究が盛んである。例えば、文献(5)では、円柱周りの流れを 3 次元 CFD 解析により求めて音源データの内外挿を行い、それを Curle の式⁽⁶⁾に代入してエオルス音の予測を試みており、実験値と良い一致を得ている。

ところで、著者らの行った風洞実験によれば、円柱と正方形柱から生じるエオルス音の大小には、明らかに一定の関係がみられる⁽⁷⁾。例えば、円柱、正方形柱、迎角 45 度の正方形柱（以下、各々、●、■、◆と記す）を採り挙げた場合、エオルス音の大小関係は、ほぼ“■ > ◆ ≒ ●”となる。この様な騒音の大小関係を解析的に求めることが可能になれば、低騒音化設計への一助となるのは間違いのないであろう。しかし、種々の断面形状とエオルス音の大小関係を同一の解析ツールにより評価し、比較した研究例は未だ見当たらない。

そこで本研究では、先の●、■、◆なる柱状物体を例に採り挙げ、解析的にエオルス音を評価し、各々の比較を行う。

流れの解析においては、(i)計算の容易性および計算時間の短縮、(ii)3 次元 CFD 解析の必要性の検討、の観点から、2 次元 CFD 解析の適用を試みる。音の伝播解析には Curle の式を用いる。なお、不足するスパン方向の流れの情報については、相互相関関数に基づく「相関長さ⁽⁸⁾」を実測して補う。最後にエオルス音の予測値と実験値の比較結果より、2 次元 CFD 解析に基づく本予測法の有用性について検討する。

* 原稿受付 1998 年 10 月 5 日。

*¹ 正員、川崎重工(株) (〒673-8666 明石市川崎町 1-1)。
E-mail: aoki@ati.khi.co.jp

2. エオルス音の予測方法

2・1 予測方法の概要 流体騒音の総合的な予測フローを図1に示す。本研究では、音源解析に前述の理由により2次元CFD解析を用い、音の伝播解析には、①計算方法の容易さ、②流れ場と音場の関係の見通し易さ、の観点から式(1)に示すCurleの式の双極子項を用いた(図1中の■部分を参照)。

$$p'(x,t) = \frac{1}{4\pi c} \frac{x_i}{r^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_{S(y)} n_i \cdot P(y,\tau) dS(y) \dots (1)$$

ここで、 p' は遠距離場における音圧、 c は静止流体中の音速、 P は物体表面上の圧力であり、また、 x は観測点座標、 y は音源位置座標、 n_i は物体表面における外向き単位法線ベクトル、 r は観測点と音源点の間の距離、 S は物体表面、 t は観測点における時刻、 τ は音源点における時刻($t - r/c$)をそれぞれ表す。

式(1)は、①扱う流れが低マッハ数である、②物体の寸法が音波の波長に比べて小さい、③観測点が音波の波長に対して十分遠方にある、の3つの仮定に基づいており⁽⁶⁾、本研究では式(1)の適用に関して問題ない。

さらに式(1)に対して、(i)物体表面における圧力変動が挟帯域不規則振動である、(ii)圧力変動の振幅がスパン方向に一樣である、(iii)観測点が流れに対して直角方向(揚力方向)の位置にある、の仮定を考慮して音響インテンシティを求めると、式(2)のようになる⁽⁸⁾。

$$I(r) = \overline{p'(x,t)^2} / \rho c = \frac{\rho U^6 C_{l_{rms}}^2 St^2}{16 r^2 c^3} Lc(L - \gamma) \dots (2)$$

ここで、 ρ は静止流体の媒質密度、 U は主流の流速、 $C_{l_{rms}}$ は断面揚力係数の実効値、 St はストロハル数、 L はスパン長、上付一(bar)は時間平均をそれぞれ表す。

また、 Lc は「相関長さ」、 γ は相互相関関数の図心であり、スパン方向に分布する流体物理量の相互相関関数 $r(\xi)$ を用いて、次式で与えられる。

$$Lc = 2 \int_0^L r(\xi) d\xi, \gamma = \int_0^L r(\xi) d\xi / \int_0^L r(\xi) d\xi \dots (3)$$

式(1)と式(2)は異なる式の様に見えるが、計算に必要なパラメータは両式とも同じである。すなわち、物体表面に加わる流体力の時々刻々における変動の分布が必要となる。そこで、式(2)に基づき話を進めると、本式において流れ場の条件や供試体の寸法以外で未知なパラメータは、① Cl_{rms} 、② St 、③ Lc および γ 、の3種類となる。本研究では、①と②を2次元CFD解析より求め、③を実験より求めた。なお、①～③と同様の情報があれば、後述するように式(1)による計算も可能である。

2・2 2次元CFD解析の概要 本研究では、(株)計算流体力学研究所が開発した2次元CFD解析コード“Nag2dgh⁽⁹⁾”を用いた。Nag2dghは、非圧縮性N-S式と連続の式を差分法で離散化して、流速ベクトルと圧力の数値解を求めるコードである。

Fig.1 Prediction flow of aerodynamic sound

(a) Global domain

(b) Near the boundary surface

Fig.2 Grid system on two-dimensional CFD analysis

Fig.3 Low noise wind tunnel

Fig.4 Schematic diagram of experimental apparatus

連続の式は、圧力の Poisson 方程式を解くことで陰的に満足される。また、時間については 2 次精度 Crank-Nicolson 法で、空間については多方向差分法で差分化される。非線形対流項は、3 次精度風上差分法で離散化される。計算格子は O-type で、解析領域の半径は $30D$ (D :断面代表寸法) であり、格子点数を 128 (周方向) $\times$ 64 (半径方向) とした。物体の境界近傍における最小格子幅は $0.1/Re^{1/2} \cdot D$ とした。ここで、 Re はレイノルズ数を表す。解析時間刻みは、 D と U に基づく無次元時間で 0.007 とした。円柱の場合を例にとり、計算格子を図 2 に示す。

2・3 風洞実験の概要

2・3・1 風洞の概要 本研究で用いた低騒音風洞の概略を図 3 に示す。ノズルの縮流比は 16 で、吹き出し口の断面寸法は 200 mm (高さ) $\times$ 200 mm (幅)

であり、開放吹き出し型である。また、風速 50m/s における吹き出し口中心からの 500 mm 位置での暗騒音レベルは 61dB(A)、乱れ度は 1 % 以下、吹き出し口における平均速度の非一様性は 1 % 以下である。

2・3・2 実験の概要 実験装置の概要を図 4 に示す。図中に示す様に、2 次元な流れを得るため、供試体の両端部には音響透過性の端板⁽¹⁰⁾を装着した。また、供試体が流体に曝されるスパンの長さの影響についても調べるため、低騒音風洞の吹き出し口を前述の $\square 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ の他に、 $\square 400 \text{ mm}$ (高さ) $\times$ 100 mm (幅) を用いた場合の実験も行った。

本実験では、供試体のスパン方向に加わる流体力の 3 次元の様子を把握するため、2 本の熱線プローブを後流に配置して流速変動を計測し、Z 方向における 2 点間の相関関係を調べた。

熱線プローブの配置については、直径 10 mm ($D=10 \text{ mm}$) の円柱を用いた予備実験 ($U=30\text{m/s}$) より、プローブが円柱に近接し過ぎると発生音に影響を及ぼし、また後流における流速変動の分布が X 方向に比べて Y 方向で急峻となる結果が得られた。よって、本研究では後流の様子が適度に捉えられる $X=3.5D$, $Y=2.0D$ (原点は供試体の中心) の位置に熱線プローブを配置した。

エオルス音の計測は、図 4 中に示す位置で流れの計測と同時にを行った。実験データの処理には、(株)小野測器製 FFT アナライザ CF-350Z を使用した。FFT 処理時の周波数分解能は、 $f_{\max}=10\text{kHz}$ ($N=1024$, $\Delta f=25\text{Hz}$) とした。また、マイクロフォンは、キャリブレーション装置を用いて実効値補正を行った。

相関長さ L_c の算出においては、コヒーレンスを用いる方法も提案されているが⁽⁵⁾、コヒーレンスからは音の伝播解析に必要な位相情報を得ることができない。よって、本研究では後流の Z 方向における相互相関関数 $r(\xi)$ を用いて、式(3)より L_c を求めた。

3. エオルス音の予測結果

本研究では、直径 10 mm の円柱 (●) と一辺 10 mm の正方形柱 (迎角 0 度:■, 迎角 45 度:◆) の 3 種類の柱状物体を予測の対象とした。主流速度 U を 30m/s とし、断面代表寸法 ($D=10 \text{ mm}$) に基づく実験レイノルズ数 Re は 20000 である。また、供試体が流体に曝されるスパンの長さ L は 200 mm および 400 mm の 2 種類である。

3・1 2次元 CFD 解析結果 3 つの断面形状に対する 2 次元 CFD 解析による流体力係数の時刻歴波形を図 5 に示す。本図より、 C_l (断面揚力係数) および C_d (断面抗力係数) の変動は、どの断面形状におい

でも周期的な解が得られている。

図5に示したClの時刻歴波形をFFT処理し、周波数解析したピーク値とストロハル数の結果、およびストロハル数の実験結果を表1に示す。ここでは、実験と解析のFFT処理における周波数分解能を一致させるため、CFD解析結果からの無次元サンプリング時間を120 ($=U/(\Delta f \cdot D)$)としている。表1より解析値と実験値の比較は、ストロハル数において良く一致しており、流れ場は概ね精度良くシミュレートできていると思われる。

3・2 実験結果 図6に、各断面形状に対する相互相関関数 ($\tau=0$) の計測結果を示す。表2の上2段に、図6と式(3)より求めた相関長さ L_c とエオルス音のピーク音圧レベル(実効値)を示す。表2中●の相関長さ L_c は、文献(11)に示される4~5Dとほぼ同じ値であり、本実験結果は妥当なものである。また、表2

Fig.5 Results of 2-dimensional CFD analysis
(Time history of Cl and Cd on Re=20000)

よりレイノルズ数が20000の場合、相関長さは断面形状やスパン長に依らずほぼ同じである。

ところで、エオルス音の大小関係は、表2より“■>◆≡●”であり、文献(12)の実験結果 ($D=10$ mm, $L=150$ mm, $U=20.6\sim41.6$ m/s)においても、同様の大小関係“■>◆”および“■>●”が得られている。すなわち、このようなエオルス音の大小関係は、レイノルズ数が20000程度の場合、定性的に得られる傾向であると考えられる。さらに、表2よりスパン長とピーク音圧レベルの関係は、ほぼ“ $10 \cdot \text{Log}(\text{長さ比})$ ”に従う傾向がみられる。

3・3 エオルス音の予測結果および考察 図7には、図5のCFD解析結果と表2中の L_c を式(1)に代入して求めたエオルス音の時刻歴波形を示す(観測位置は図4を参照)。すなわち、ここでは式(1)のスパン方向積分に、式(2)中の“ $L_c(L-\gamma)$ ”を用いた。このスパン方向に関するパラメータは、音圧の自乗平均値に対して与えられるため、図7では“ $L_c(L-\gamma)$ ”の平方根を用いている。以上の様な式(1)と式(2)を併用する計算方法により、2次元CFD解析結果と相関長さを組み合わせて、Curle式を近似的に解くことが可能である。なお、図7ではスパン長 $L=400$ mmを仮定した。

Fig.6 Results of wind tunnel experiment
(Distribution of cross-correlation on Re=20000)

Table 1. Results of 2-dimensional CFD analysis

Cross-section	●	■	◆
Cl (Peak value)	1.41	1.48	1.11
Strouhal number	0.217	0.128	0.185*
St (Experiment)	0.20	0.13	0.18*

*: Only for ◆, "St" is based on $D=10\text{ mm} \times \sqrt{2}$.

Table 2. Results of wind tunnel experiment

Cross-section	●		■		◆	
	L:200	L:400	L:200	L:400	L:200	L:400
Lc/D	4.8	5.9	6.7	5.4	6.6	5.7
SPL _{peak}	81dB	84dB	88dB	90dB	82dB	85dB
SPL _{peak} (Prediction)	88dB	92dB	85dB	87dB	82dB	85dB

(a) ● : Circular cylinder

(b) ■ : Square cylinder

(c) ◆ : Square cylinder

Fig.7 Results of sound prediction
(Time history of sound pressure on L=400mm)

(a) ● : Circular cylinder

(b) ■ : Square cylinder

(c) ◆ : Square cylinder

Fig.8 Comparison between prediction result and
experimental data on L=400mm

図7の時刻歴波形をFFT処理して実効値補正(−3 dB)を行い、実験結果と比較したものを図8に示す。また、図8より得られたピーク音圧レベルを表2に示すが、これは結局、式(2)に表1および表2中の値を代入して得られる結果と一致する。

表2より、ピーク音圧レベルは予測と実験の比較で、円柱を除いてはほぼ良い一致を得ている。しかしながら、エオルス音の大小関係は、実験では“■>◆≒●”であるが、予測では“●>■>◆”となり、●が最も大きくなる点で傾向が異なっている。すなわち、本予測法ではエオルス音の音圧レベルの大まかな予測は可能であるが、断面形状に依存する大小関係を予測するには不十分と言える。

発生音の大小関係において、予測と実験で異なる最も大きな原因は、●の予測値が大きいことにある。そこで、実験値が豊富に存在する●と■について、平均圧力係数 C_p と変動圧力係数の実効値 C_p' の表面分布について、本解析値と文献による実験値との比較を試みた。図9に●、図10に■について、各々 C_p と C_p' の解析と実験の比較結果を示す。

まず、図9と図10の C_p 分布をみると、●では剥離点(図中 S.P.)および後流部分が実験値と異なるのに対し、■では当然のことながら剥離点が角部になっており、 C_p の分布も全体的にほぼ一致している(図10中 Ohtsuki の結果⁽¹⁷⁾ 参照)。すなわち、●の解析は剥離点が実験に比べて後退しており、等価的にレイノルズ数が若干高い流れ場を解いた結果になっているため、ストロハル数の解析値は実験値に比べて若干高い値を示している(本解析: $St=0.217$, 本実験: $St=0.20$)。

背圧係数で比較すると、●の解析値は実験値に比べて低いため、平均抗力係数 C_d は高くなる(本解析: $C_d=1.6$, 実験: $C_d=1.2$ ⁽¹⁵⁾)。一方、■の背圧係数の解析値は実験値とほぼ一致しており、 C_d も実験値とほぼ一致する(本解析: $C_d=2.2$, 実験: $C_d=2.05$ ⁽¹⁸⁾)。

つぎに図9と図10の C_p' 分布をみると、●の場合、剥離点を少し過ぎたあたりの $\theta=90$ 度では、本解析の C_p' は約0.8を示しているが、文献(19)によれば実験値は約0.2~0.3であり、解析はかなり大きな値を示している。また、表2中のピーク CI 値より求まる CI_{rms} で比較すると、本解析では1.0、実験ではその約半分の0.6程度⁽²⁰⁾であり、●の CI_{rms} は $\theta=90$ 度付近における C_p' にほぼ対応している様である。一方、■の場合、解析結果を Bearman の実験結果⁽¹⁶⁾ と比較すると後面部で大きな差が見られるが、それ以外の部分ではかなり良く一致している。 CI_{rms} で比較すると、本解

析では約1.1、実験では1.2⁽¹⁶⁾と非常に良く一致している。これは、■では後面部における C_p' が揚力方向には殆ど影響を及ぼさず、さらに上下面での C_p' が良く一致しているために、解析の CI_{rms} が実験値と良く一致する結果になったと推察される。

以上をまとめて考察すると、●および■ともに、2次元解析では物体後部における流れが2次元性のために実現象ほど拡散されず、剥離渦の強度や乱れが強いために、 C_p' は高めに評価されているものと推察される。しかし、■の場合は剥離点が角部に固定されており、さらに物体後部の圧力変動が揚力方向(流体音の音源とも言える)には殆ど影響を与えないため、

Fig.9 Comparison of mean and r.m.s. C_p distribution between 2D-CFD analysis and experiment for circular cylinder (●)

Fig.10 Comparison of mean and r.m.s. C_p distribution between 2D-CFD analysis and experiment for square cylinder (■)

Cl_{rms} は比較的精度良くシミュレートできていると思われる。一方、●の場合は剥離点が空気の粘性に支配される不安定点であるために精度の良い予測が困難であり、剥離後の圧力変動が抗力方向のみならず揚力方向にも影響を与えるため、 St や Cl_{rms} ひいてはエオルス音の予測が精度良く一致しなかったと思われる。なお、◆について図 9 および図 10 の様な比較検討を行わなかったが、■と同様の傾向が得られているものと推測される。

一般に、3次元解析を行うと3次元流れ（セル構造や縦渦の発生など）が生じ、流体力係数は小さくなると予想される。この様な現象を2次元解析で捉えることは不可能なので、本研究では実験により相関長さを求めて3次元性を考慮する手法を用いた。本実験の結果、●と■の比較で相関長さに大きな差がないことから、セル構造の大きさにはそれほど大差がないと推測できる。したがって、2次元 CFD 解析に基づくエオルス音の本予測法において、●が■や◆に比べて精度の良いシミュレートが困難であったのは、●の剥離点の不安定性にあり、さらに Cl_{rms} が後流の3次元性の影響を受けやすい形状であるにもかかわらず、2次元解析により3次元性が考慮されなかったためと考えられる。すなわち、異なる断面形状に対するエオルス音の大小関係を同一の解析ツールにより評価する場合、2次元解析に基づく本予測法では不十分であり、セル構造や縦渦の影響なども含めた3次元解析に基づく予測が必要である。

4. 結 言

本研究では Curle の式に基づき、2次元 CFD 解析と実測した「相関長さ」の組み合わせによるエオルス音の予測法を構築し、3つの異なる断面形状●、■、◆を有する柱状物体について実験値との比較を行った。その結果、以下に示す知見が得られた。

- (1) 2次元 CFD 解析結果と実験結果の比較は、全ての断面形状でストロハル数において良く一致した。
- (2) 後流における流速変動の相互相関関数より求めた相関長さ L_c は、レイノルズ数が 20000 の場合、断面形状やスパン長に依らず、ほぼ同じ値であった。
- (3) エオルス音のピーク音圧レベルは予測と実験の比較で、ほぼ良い一致を得た。しかし、エオルス音の大小関係は、実験では“■>◆≒●”であるが、予測では“●>■>◆”であり、●が最も大きくなる

点で異なる傾向が得られた。これは、●の予測値が大きいことに起因しており、●が■や◆に比べて精度の良いシミュレートが困難であったのは、●の剥離点の不安定性にあり、さらに音源強度とも言うべき Cl_{rms} が後流の3次元性の影響を受けやすい形状であるにもかかわらず、2次元解析により3次元性が考慮されなかったためと考えられる。すなわち、異なる断面形状に対するエオルス音の大小関係を同一の解析ツールにより評価する場合、2次元解析に基づく本予測法では不十分であり、セル構造や縦渦の影響なども含めた3次元解析に基づく予測が必要である。

最後に、本研究を遂行するにあたり、(有)流体物理研究所・橋口真宜氏に有益な助言を頂いたことを記すとともに、感謝の意を表します。

文 献

- (1) 森藤, 日本航空宇宙学会誌, 第 43 巻-第 493 号(1995), 108-113.
- (2) 青木・他, 航空宇宙技術研究所特別資料 SP-30(1996), 35-40.
- (3) 深野, 日本音響学会誌, 第 49 巻 11 号(1993), 785-791.
- (4) 例えば P.Leehey, et al., J.Sound Vib.(1971)13(4), 465-483.
- (5) 加藤・他, 機論(B), 60-569 (1994-1), 126-132.
- (6) Curle,N., Proc.R.Soc.London, Ser.A, 231(1955), 505-514.
- (7) 石原・他, 機講論(第 74 期通常総会講演会) No.97-1, 446-447.
- (8) Blevins,R.D., "Flow-Induced Vibration(2nd ed.)" (1990), 358.
- (9) 橋口・他, 日本航空宇宙学会第 27 期年会講演会(1996), 96-97.
- (10) 藤田・他, 機論(B), 62-593 (1996-1), 187-193.
- (11) 横井・他, 機論(B), 57-534 (1991-2), 427-433.
- (12) 藤田・他, 機論(B), 63-610 (1997-6), 1974-1979.
- (13) M.M.Zdravkovich, "Flow Around Circular Cylinders Vol.1"(1997), 306.
- (14) M.M.Zdravkovich, "Flow Around Circular Cylinders Vol.1"(1997), 106.
- (15) 富田, "水力学" (1987), 155.
- (16) P.W.Bearman, E.D.Obasaju, J. Fluid Mech. Vol.119 (1982), 297-321.
- (17) Y.Ohtsuki, Proc. 5th Symp. on Wind Effects on Structures(1978), 169-175.
- (18) B.E.Lee, J. Fluid Mech. Vol.69 (1975), 263-282.
- (19) P.W.Bearman, I.G.Currie, J. Fluid Mech.Vol.91 (1979), 661-677.
- (20) M.M.Zdravkovich, "Flow Around Circular Cylinders Vol.1"(1997), 138.