

種々の辺長比を持つ矩形柱から 発生する空力音特性

中藤誠二¹・木村吉郎²・藤野陽三³・小川隆申⁴・石原孟⁵

¹正会員 博(工) 関東学院大学講師 工学部 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)

²正会員 Ph.D. 九州工業大学助教授 工学部 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

³フェロー Ph.D. 東京大学大学院教授 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁴工博 成蹊大学助教授 工学部 (〒180-8633 東京都武蔵野市吉祥寺北町3-3-1)

⁵正会員 工博 東京大学大学院助教授 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

種々の辺長比の矩形柱から発生する空力音の基本特性を低騒音風洞を用いて実験的に明らかにした。辺長比は1, 3, 5, 7.5の4種類であり、風速15m/sと30m/sで測定を行った。2種類の風速における空力音のスペクトルピークに対応するストローハル数はほぼ等しく、多くの場合ピーク音圧レベルの増大は風速の6乗則を満たすことを示した。音圧レベルが最大となる迎角は辺長比 $B/H=1, 3, 5, 7.5$ の矩形柱について、それぞれ $\alpha \approx 2^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 7^\circ$ であったが、その音圧レベルの大きさはほぼ近い値となった。一方、それぞれの辺長比において、最大音圧レベルの迎角による変化の幅は約20dBであった。また $B/H=1$ の場合について、Curleの式を用いて実験条件の違いを補正することで既往の測定結果との比較を行った。

Key Words : *rectangular cylinder, aerodynamic sound, SPL, Curle's equation, low-noise wind tunnel testing*

1. はじめに

空力音に関する研究は、航空機、自動車などの輸送機械、また送風機などの流体機械から発生する空力音などを主な対象として行われてきた。一方、風の強い日には、高層ビルや橋の高欄などの建設系構造物本体もしくは付属物からも空力音(流体の非定常運動によって発生する音波)が発生して問題となる場合がある^{1), 2), 3)}が、それらを対象とした研究はあまり多くない。

Lighthill⁴⁾は音響学的類推に基づきNavier-Stokesの方程式から音響方程式を導き出した。これは、遠方に伝わる音波を生じる流れ場のなかの音源モデルを与えるものである。Lighthillの理論によればジェット騒音の強さは風速の8乗に比例することが導かれる。Curle⁵⁾はLighthillの音響方程式に対して物体の影響を考慮した音響方程式の解を示し、低マッハ数流れでは音源が物体表面の変動圧力で表されることを導いた。物体から発生する空力音はCurleの式によってその特性が説明される場合が一般的である。Curleの式の応用例として円柱からの渦放出に伴う空力音(エオルス音)がある。LeeheyとHanson⁶⁾は、

円柱から発生する空力音について同じ模型に対して空力音、相関長さ、変動揚力を測定し、Curleの式が成り立つことを確認した。なおCurleの式は空力音の強さが風速の6乗に比例することを導くが、実験結果は相関長さの風速依存性による影響が無視できないことを示している。

一方、円柱とともに基本的な構造部材の一つである矩形柱から発生する空力音に関する研究は、正方形柱があるのみで^{7), 8), 9)}、その他の辺長比 B/H (B :迎角 0° における流れ方向の辺長、 H :迎角 0° における流れ直角方向の辺長)については検討された例はない。実際の構造部材は正方形柱であることが稀であることを考えると、矩形柱の空力音の基本特性を明らかにする意義は大きい。なお、矩形柱から発生する空力音について数値解析による研究も行われているが^{10), 11)}、数値解析精度を検証するためにも詳細な実験結果が必要とされている。

なお、空力音を発生する構造物の典型的なものとしてルーバーや手すりがあげられるが、これらは一般に円柱や矩形柱などの2次元柱が多数並べられた構造をしている。形状によっては柱列間の音場によるフィードバックが空力音の発生に大きく影響する

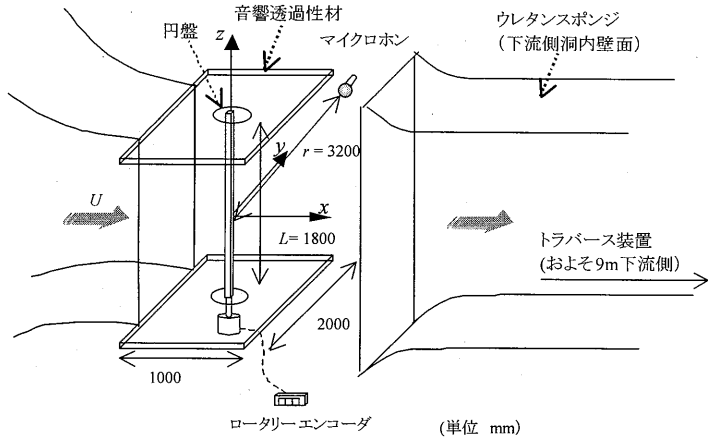
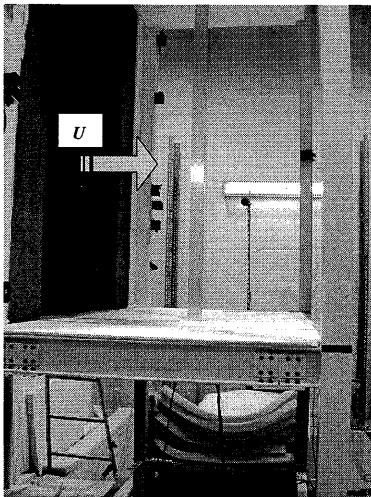


図-1 実験装置

場合²⁾があるが、単柱から発生する空力音の重ね合わせで空力音の基本的特性が決まる場合もあると考えられる。

そこで本研究では、基本的構造部材である矩形柱単体から発生する空力音の特性を明らかにすることを目的として、低騒音風洞を用いて種々の辺長比を持つ矩形柱に対して迎角を変化させて基本的特性である音圧レベルとストローハル数を測定した。さらに測定された空力音の音圧レベルとCurleの式との整合性の検証を試みた。

2. 実験手法

空力音の測定は東京大学工学部所属の回流型の低騒音風洞の開放型測定部において行った¹²⁾。ノズル断面は高さ1.8m×幅1.0mである。模型設置位置であるノズル口から下流方向500mmの位置において乱れ強さは0.3%以下である。用いた模型は $B/H=1, 3, 5, 7.5$ の鋼製もしくはステンレス製の棒材である(表-1)。模型長さが1.8mと長いため、エッジを鋭くするために表面の削りだし加工等を行うと模型に反りが生じることが懸念されたことから、引き抜き材をそのまま用いることとした。

精度の良い測定を行うためには、風洞の暗騒音をできるだけ小さくすることが重要であることを考慮して以下のような実験装置を構成した。

まず、開放部下流側の空力弾性試験・境界層試験用測定部の内壁全面に厚さ5cmのウレタンスポンジを取り付け、また風洞内からの撤去が困難なトラバース装置を、同様のウレタンスポンジで覆った。その結果、風速15m/sで吹き出し口中心から下流0.75m、

水平方向1.5mの点における暗騒音が10dB低減し48dB(A)となった。

次に、音響的な反射や共鳴を抑えるため厚さ6mmの音響透過性の端版¹³⁾(1000×2000mm)を模型の上下端において流れ方向に平行に取り付けた(図-1)。音響透過性材は剛性が小さいため、その外側を厚さ3mmのパンチングメタルで補剛し、角パイプ支柱により支持した。模型は端板の外側において、鋼製の枠組みに取り付けられたバースで模型の上下端部を固定した。本実験では模型を鉛直方向に取り付けたため、迎角0°の位置を水準器等で決めることができない。そこで、迎角を変化させたときの空力音のピーク周波数が、迎角0°に関して対称となるように迎角0°を定めた。

測定風速は $U=10\sim 35\text{m/s}$ とした。模型断面の高さ H を基準とするレイノルズ数は $6.4\times 10^3\sim 2.3\times 10^4$ である。模型設置位置での気流の乱れ強さは0.3%以下である。閉塞率は迎角の変化によって1.0~7.57%と変わるが、ほとんどのケースで5%以下であるので、閉塞効果の影響は小さいと考えられ、閉塞率による補正は行っていない。

また、壁面に設けた開口部と模型の間の隙間に軸方向の流れが生じ空力特性に影響を与えることがあるため¹⁴⁾、模型端部に端版と同じ厚さの円盤を取り付け、約1mm以下とほとんど隙間のないようにした。

x, y 軸を図-2のように定める。ノズル口から下流側0.5m、側方3.2m/s ($x=0, y=3200, z=0$)においてマイクロホン(RION製UC-30)によって空力音の測定を行った。測定位置が近い場合、距離減衰が大きいので遠方に伝播しない近距離場の圧力変動が含まれる¹⁵⁾。遠距離場の近距離場に対する比をデシベ

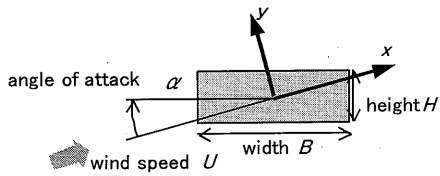


図-2 模型断面

表-1 模型断面の諸元

辺長比B/H	模型断面の幅B	模型断面の高さH
1	10	10
3	30	10
5	50	10
7.5	75	10

(mm)

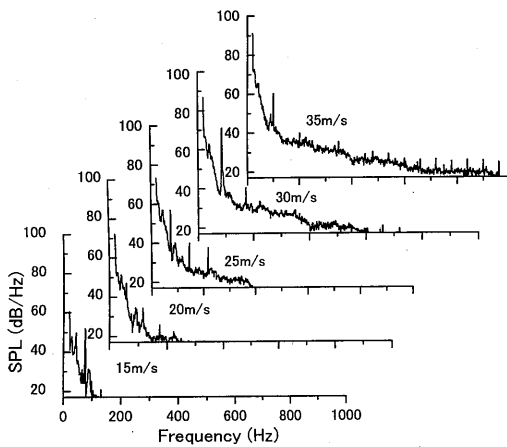


図-3 暗騒音のスペクトル

ル表示で表すと次の式のようにになる。

$$10 \log_{10} \left(\frac{r\omega}{c_0} \right)^2 \quad (1)$$

ここで ω : 角周波数, r : 音源と測定点の距離, c_0 : 音速である. 本測定位置 $r=3.2\text{m}$ では 54Hz 以上の表面変動圧力による空力音は, 遠距離場の成分が近距離場の成分より 10dB 以上大きく, 遠距離場と見なして近距離場の成分を無視できる.

マイクロホンにはウィンドスクリーン (RION製 WS-05) を取り付けてある. マイクロホンは精密騒音計 (RION製 NA-40) に接続されており, 騒音計からの出力を精密騒音計に内蔵されている 20Hz のハイパスフィルターおよび 20kHz のローパスフィルターを通した後, サンプリング周波数 50kHz で 20 秒

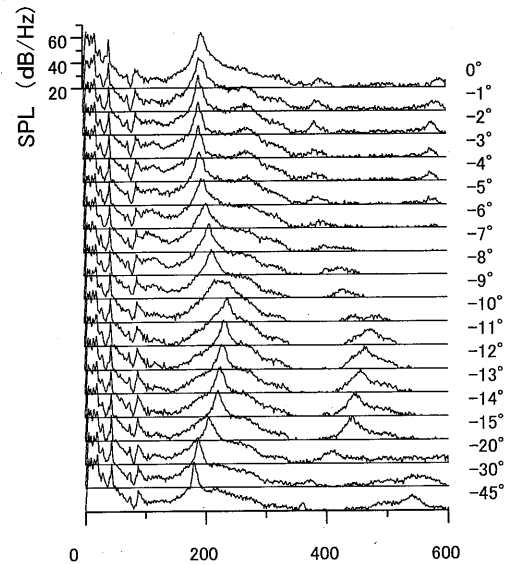
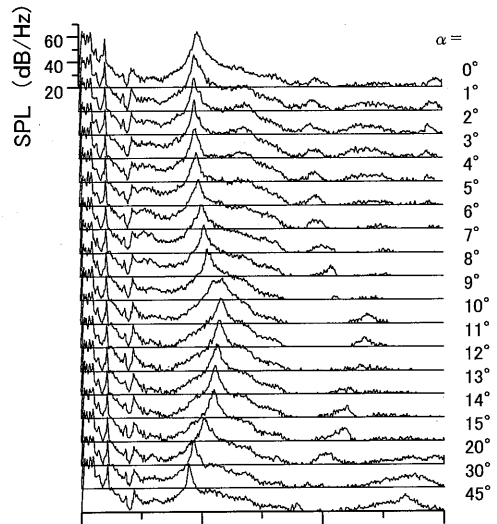


図-4 SPLのスペクトル密度 ($B/H=1, U=15\text{m/s}$)

間測定した. 得られたデータは 20 分割して FFT 解析を行い, その平均をとった.

図-3に暗騒音の音圧レベルのスペクトルを示す. 低周波数域側において暗騒音が増加する傾向にある. いずれの風速においても 70Hz 付近にピークが存在し, 風洞の音場共鳴によるものと予想されるが, 詳細は不明である. また $f = BN$ (Hz) (B : 動翼枚数, N : 回転数(Hz)) で表されるファンの回転音が存在し, 風速 30m/s ではちょうど上記の音場の共鳴周波数と一致するため, 暗騒音が大きくなっている. ファン回転音の高調波成分もわずかに見られるが, 100Hz 以上については 40dB/Hz 以下と, ほぼ良

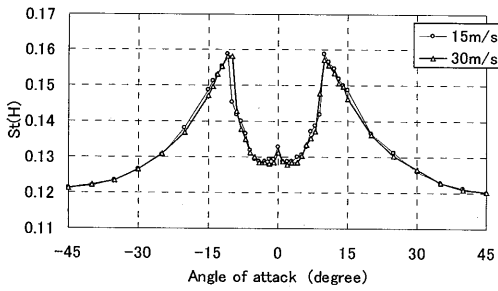


図-5 ストローハル数の迎角による変化 ($B/H=1$)

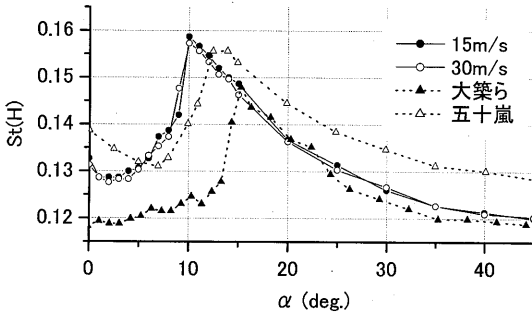


図-6 図-5の $\alpha \geq 0^\circ$ の範囲の拡大図および既往の測定値との比較 (大築ら¹⁶⁾, 五十嵐¹⁷⁾)

好な暗騒音特性となっている。

3. 測定結果と考察

空力音の測定結果を辺長比ごとに以下に示す。音圧レベルのスペクトルおよびピークストローハル数、ピーク音圧レベルの迎角による変化をそれぞれ示す。

(1) $B/H=1$ の場合

図-4に風速15m/sのときの迎角による音圧レベルのスペクトルの変化を示す。 $\alpha=0^\circ$ において約200Hzにスペクトルのピークがある。迎角を増加していくと、 $\alpha \approx 10^\circ$ で周波数は最大となり、その後減少する。

迎角 10° のスペクトルを見るとピークがフラットになっており、フラットなピークの低周波数側が 10° 以下のピーク周波数の延長線上にあり、高周波数側は 10° 以上のピーク周波数の変化の延長線上にあるといえる。迎角 10° において流れ場の状態が変化(スイッチ)していることが想像されるが詳細は明らかでない。

迎角が正の場合と負の場合で、基本周波数には大きな違いは見られないが、400Hz付近に見られる2次高調波のピークの大きさに違いが見られる。すなわち、迎角 $11 \sim 15^\circ$ の範囲の2次高調波のピークが負

迎角においてより明確に現れており、例えば迎角 -14° の音圧レベルのほうが 14° のものに比べて約9dB/Hz大きい。 $\alpha \approx 10^\circ$ 以上では、前縁とそれと反対側の側面の後縁から渦が交互に放出される流れ(alternate-edge vortex shedding)が生じるとともに、前縁で剥離した流れが側面に再付着していると考えられる。特に $\alpha=11 \sim 15^\circ$ 付近では強い剥離泡が形成されていると予想される。負の迎角の場合、観測点側の側面においてこの剥離泡が生じており、このことが遠方場のスペクトルに影響している可能性がある。すなわち、流れの中に置かれた鈍頭物体から放出されるカルマン渦により発生する空力音(エオルス音)だけでなく、前縁剥離流れと固体壁の干渉による空力音の寄与が比較的大きい可能性が考えられる。

ただし2次高調波は基本周波数のピークに比べ20dB以上小さく、空力音の強さは基本周波数のピークが支配的である。そこで、以下では基本周波数およびピーク音圧レベルの迎角による変化を考察する。

図-5に風速15, 30m/sにおけるストローハル数 $St(H)$ の変化を示す。風速による違いはほとんど見られない。 $\alpha=0^\circ$ を中心にほぼ左右対称のグラフとなる。ストローハル数は $\alpha=0^\circ$ で $St \approx 0.13$ であり、迎角の増加に対してわずかに減少した後、急激に増加し、 $\alpha=10^\circ$ で最大値 $St \approx 0.16$ となり、それ以降急激に減少して、 $\alpha=45^\circ$ で $St \approx 0.12$ となる。

図-6に既往の流れ場に関する実験のうち比較的迎角の刻み幅の小さいもの^{16), 17)}の St 数と比較する。大築らの実験の Re 数は $0.65 \sim 0.76 \times 10^5$ 、アスペクト比は6.25である。 $\alpha=0^\circ$ から最大値をとる迎角まで、ストローハル数が単調に増加する場合と一度減少してから増加する場合とがあることが指摘されているが¹⁸⁾、本実験結果では後者となっている。 St 数が最大となる迎角は、本実験では約 10° となったが、既往の研究では約 13° となっている。気流の乱れが比較的近い実験でも、約 13° 付近となっていることから、本実験においてアスペクト比が180と大きいことが原因である可能性がある。

松本ら¹⁹⁾、白土ら²⁰⁾は同じく完全なく離断面である辺長比0.5($B/H=2$)の矩形柱について、迎角が変化するときの、 St 数の変化と流れ場の関係について考察している。短辺が流れに正対している状態を 0° とすると、迎角 0° で完全なく離流れであり、 $0^\circ < \alpha < 10^\circ$ では非定常再付着流れとなり、この範囲では St 数の変化が大きい。 $10^\circ < \alpha < 67^\circ$ の範囲では側面に定常的に再付着する流れとなる。このような変化について、迎角 0° の矩形柱の辺長比を変化させていくと St 数が $B/H=2.8$ で不連続となることと同等の変

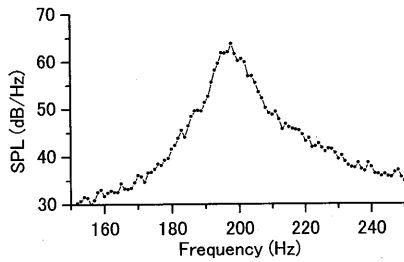


図-7 図-4の迎角0°のケースのピーク付近の拡大図

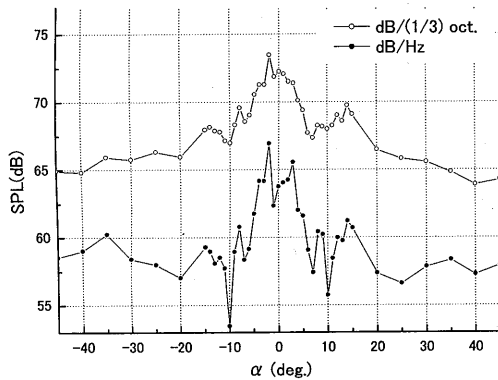


図-8 SPLのピーク値の1Hzバンドレベルと1/3オクターブバンドレベル ($B/H=1$, $U=15\text{m/s}$)

化が現れているとしている。また90°から迎角を減少させると、 St 数が増加するが、見かけ上奥行きが長くなる効果に対応しているとしている。

$B/H=1$ も $B/H=2$ と同じく完全に離型断面であることから、同様な流れ場の変化を想定すると、図-5において St 数が急変する5~10°では非定常再付着流れに対応し、 $\alpha=10^\circ$ より大きい迎角では側面に定常的に再付着する流れとなると考えられる。また0°からわずかに St 数が減少し $\alpha=2^\circ$ において最小値をとることから、見かけ上の奥行きが $\alpha=2^\circ$ において最小になると考えられる。後述のように音圧レベルは $\alpha=2^\circ$ において最大値をとる傾向が見られる。

次にピーク値の算定方法について示す。図-7に図-4の $\alpha=0^\circ$ のときのピーク近傍の拡大図を示すが、スペクトルはピーク周波数を中心に周辺の周波数域に分散したものとなる。ピーク値の評価に際して、ピーク値を用いた場合、スペクトル解析の分解能が不足してピーク振動数を逃している場合やデータにばらつきがある場合が考えられる。図-8にピーク値およびピーク周波数を中心に1/3オクターブバンド幅の範囲で積分した値の迎角よる変化を示す。1 Hzあたりの音圧レベルのピーク値の迎角による変

化を見ると、 $\alpha=2^\circ$ にピークが、また $\alpha=10^\circ$ に落ち込みが見えるが、ピーク値を中心に1/3オクターブバンドの範囲で積分した音圧レベルではスペクトルはフラットな形状になる。

図-4のスペクトルを見ると、 $\alpha=2^\circ$ ではピークが鋭く、また $\alpha=10^\circ$ ではピークの山がなだらかである。スペクトルのピーク形状は流れ場の規則正しさに関する何らかの特性を反映したものと考えられるが、空力音のスペクトルのみから詳細な議論をするのは困難であるため、ここではこれらを指摘するにとどめる。

空力騒音問題という観点から音の大小を比べる場合、ピーク値を用いるよりも一定のバンド幅内に含まれるエネルギーの大小を比較の方が聴感特性を反映したものであると思われる。バンド幅としてここでは1/3オクターブを用いたが、一般の騒音評価でもよく用いられており、空力音の強さを評価する際の値として適当であると考えられる。なお、騒音評価における1/3オクターブバンド解析はバンドの位置を固定しているが、本研究では音のスペクトルが純音に近いことから、解像度1Hzのスペクトル解析を行った後、ピーク周波数を中心に1/3オクターブのバンド幅を積分した値をピーク値とした。

次に、既往の実験結果ととの比較を試みるために、Curleの理論を2次元柱に応用した音圧レベル(SPL)の式²⁾を示す。

$$\begin{aligned} \text{SPL} &= 10 \log_{10} \left(\frac{\overline{p^2}}{p_0^2} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{\cos^2 \theta}{16c^2 r^2} St^2 C_L^2 L L_C \rho_0^2 U^6 / p_0^2 \right) \quad (2) \end{aligned}$$

ここで $\overline{p^2}$ ：音圧の二乗平均値、 p_0 ：基準音圧 ($2.0 \times 10^{-5} \text{Pa}$)、 ρ_0 ：平均密度、 L ：模型のスパン長、 L_C ：模型軸方向相関長さ、 C_L ：変動揚力係数、 U ：風速、 St ：ストローハル数、 θ ：2次元柱と観測点を結ぶ方向と主流直角方向のなす角度である。流れ場が相似であるならば、空力音の強さは風速の6乗に比例することが分かる。これがいわゆる空力音の6乗則と呼ばれているものである。式(2)は、空力音の強さは模型に作用する空気力の大きさとその相関・振動数から求められることを示しているが、 C_L 、 L_C 、 St の値は実験や数値流体解析で求める必要がある。

図-9に風速15、30m/sにおけるピーク音圧レベル(1/3オクターブ)の迎角よる変化を示す。風速15m/sの測定値から、6乗則 $\overline{p^2} \propto U^6$ を用いて予測

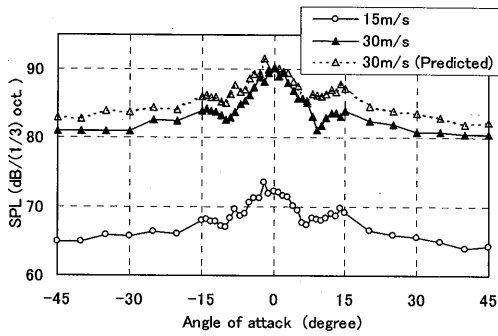


図-9 SPLの迎角による変化(B/H=1)

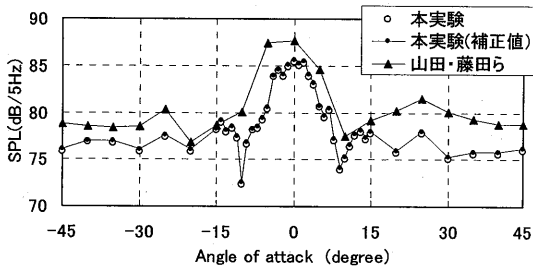


図-10 音圧レベルの既往の実験結果との比較 (B/H=1)

した風速30m/sの値も同時に示す。迎角によっては数dBの違いはあるものの予測値は測定値と近い値を示しており、6乗則と整合した結果となっている。

正方形柱については山田・藤田ら⁷⁾が同様な実験を行っている。山田・藤田らの風速31.1m/sの空音の測定結果を、本実験の30m/sの結果とともに図-10に示す。ここで模型長さ、測定位置、風速の違いを補正するために式(2)を用いて次のように本実験結果を山田・藤田らの実験条件に合わせて補正值 SPL_m を求めた。

$$SPL_m = SPL_1 + 10 \log_{10} \left(\left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \times \frac{L_2}{L_1} \times \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^6 \right) \quad (3)$$

ここで添え字1は本実験における値、添え字2は山田・藤田らの実験における値を示す。相関長さ、 St 数については等しいと仮定した。山田・藤田らの実験は、 $r_2=1m$ 、 $L_2=15cm$ 、 $U_2=31.1m/s$ であり、模型の断面は本研究と等しく10mm×10mmである。本実験の模型が10倍以上大きい効果と、模型と観測点の距離が3倍以上長い効果がほぼ打ち消し合って、補正量はわずかである。ここでは本実験結果も、山田・藤田らの解析にあわせて解像度5Hzのスペクトル解析を行いそのピーク値を示した。±10°付近において本実験結果がかなり小さいが、それ以外は数

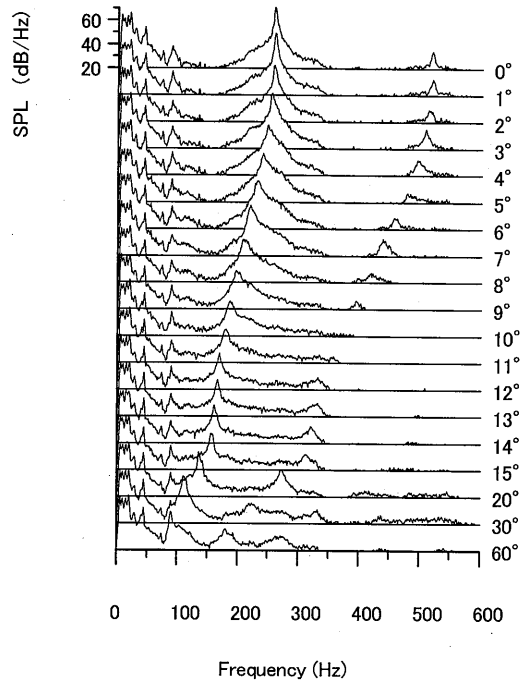


図-11 SPLのスペクトル密度 (B/H=3, U=15m/s)

dB程度の違いである。空力音の測定は実験条件の影響を強く受けるため、このような定量的な値の比較はこれまで行われていない。したがって図-10の差異の大きさを判断するのは難しいが、人間の聴覚が大きさの違いを判断できるのは3dB程度であることから、-45°~-15°、0°~15°の範囲ではよく合っていると云える。それ以外の迎角において値が異なる要因としては、アスペクト比の違いによって相関長さが異なっているなどの可能性が考えられる。

(2) B/H=3, 5の場合

$B/H=3, 5$ の矩形柱は $\alpha=0^\circ$ において周期的再付着断面となる特性をもつ²²⁾。

図-11に風速15m/sのときの迎角による音圧レベルのスペクトルの変化を示す。 $\alpha=0^\circ$ において約260Hzに基本周波数のピークがある。また2倍の周波数に $B/H=1$ の矩形柱では見られなかった2次高調波が見られる。迎角が増加するにつれて、徐々にピーク周波数が減少する。2次高調波については迎角が大きくなるに従いそのピークが明確でなくなる傾向が見られる。ここでは特にグラフを示さないが、 $B/H=1$ のときのように迎角の正負によるスペクトルの相違は特に見られなかった。

図-12に代表長さを長辺長さ B とした $St(B)$ の迎角による変化を示す。 $St(B)$ は $\alpha=0^\circ$ で最大となり、迎

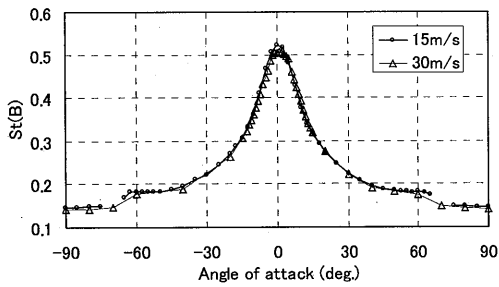


図-12 St 数の迎角による変化 ($B/H=3$)

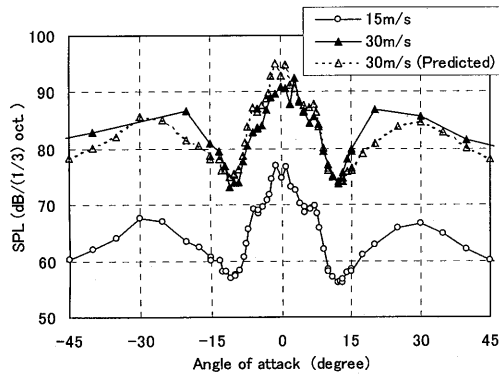


図-13 SPL の迎角による変化 ($B/H=3$)

角の増加に従い単調に減少する。 $B/H=3$ の矩形柱では、 $\alpha=0^\circ$ において Re 数が約 10^3 以下の範囲で、ストローハル数に Re 数依存性があることが分かっているが²²⁾、本実験はその範囲外であり Re 数依存性は見られない。

図-13に風速15, 30m/sにおけるピーク音圧レベルの迎角による変化を示す。 $\alpha \approx 0^\circ$ で最大値をとり、 $\alpha \approx 11^\circ$ で極小値をとる。同じグラフに6乗則を用いて求めた予測値も示す。数dB程度値の異なる迎角もあるが6乗則が適用可能であることを示唆している。

なお $B/H=1$ のときのように St 数と音圧レベルの極値をとる迎角が一致する傾向は見られない。

次に $B/H=5$ の場合の結果を示す。

図-14に風速15m/sのときの迎角による音圧レベルのスペクトルの変化を示す。 $\alpha=0^\circ$ において約175Hzにピークが存在するが、その高調波は明確でない。 $\alpha \approx 3^\circ$ で周波数が最大になり、それより大きい迎角で高調波が明確に現れるようになる。迎角の正負による違いは特に見られなかった。

図-15に風速15, 30m/sにおけるストローハル数の迎角による変化を示すが、両者の値はほぼ等しい。

図-16に風速15, 30m/sにおける音圧レベルの測定値および15m/sの測定値から予測した30m/sの音圧レベルの迎角による変化を示す。音圧レベルは $\alpha \approx 5^\circ$ で最

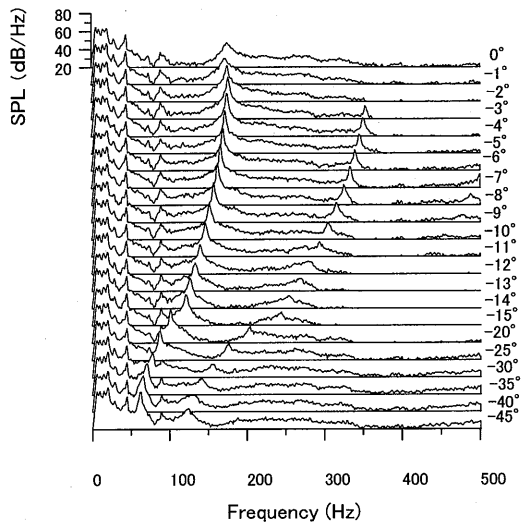


図-14 SPL のスペクトル密度 ($B/H=5$, $U=15\text{m/s}$)

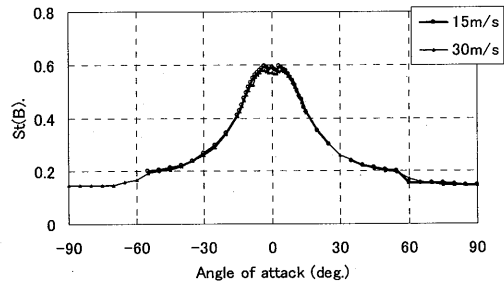


図-15 St 数の迎角による変化 ($B/H=5$)

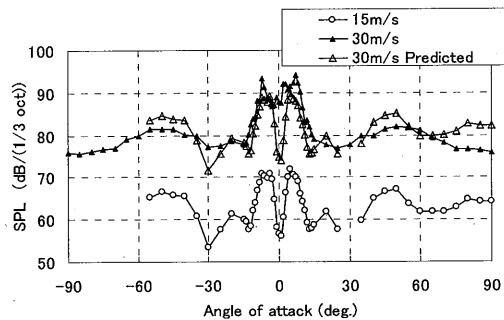


図-16 SPL の迎角による変化 ($B/H=5$)

大値をとる。 $\alpha > 60^\circ$ の予測値と測定値の差異は、15m/sの空音の発生周波数が低く暗騒音の影響を受けていることが原因と考えられる。迎角 0° において測定値が予測値に比べて10dB以上小さい。この場合、発生周波数は高いので暗騒音の影響は小さい。また図-15に示したように St 数はほぼ等しいことから、変動揚力係数 C_L または相関長さ L_c が風速に

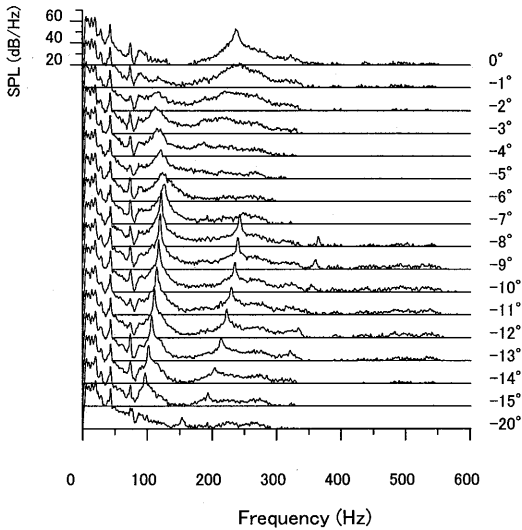


図-17 SPLのスペクトル密度 ($B/H=7.5$, $U=15\text{m/s}$)

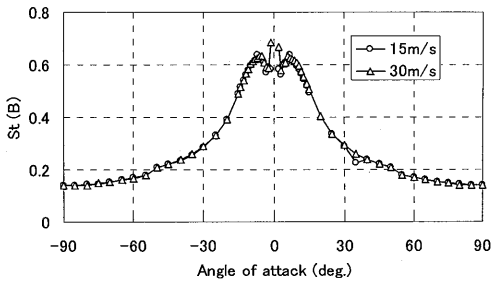


図-18 St 数の迎角による変化, 低周波数域のピーク ($B/H=7.5$)

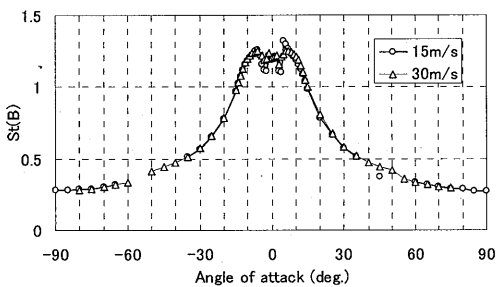


図-19 St 数の迎角による変化, 高周波数域のピーク ($B/H=7.5$)

よって異なっていることが予想される。

(3) $B/H=7.5$ の場合

$B/H=7.5$ の矩形柱は $\alpha=0^\circ$ において, 側面前縁側に剥離バブルが形成され定期的再付着断面となる特性を持つ²²⁾。

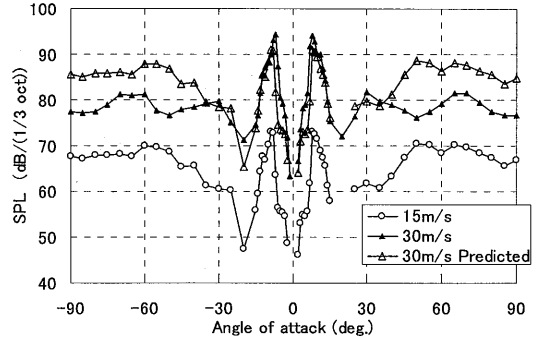


図-20 SPLの迎角による変化, 低周波数域のピーク ($B/H=7.5$)

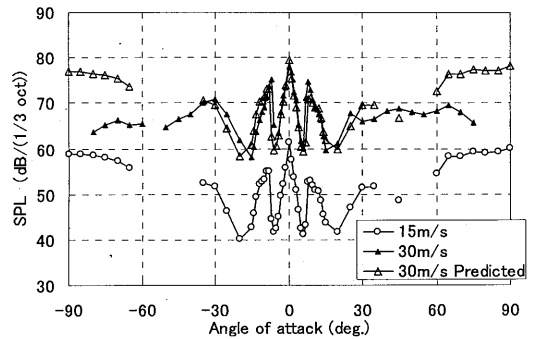


図-21 SPLの迎角による変化, 高周波数域のピーク ($B/H=7.5$)

図-17に風速15m/sのときの迎角による音圧レベルのスペクトルの変化を示す。 $\alpha=3\sim5^\circ$ を境に基本周波数のジャンプが見られる。迎角 0° のときに見られた約240Hzにおけるピークの大きさが迎角の増加に伴い小さくなり, 迎角 3° 付近では明確なピークがなくなりスペクトルはbroad-bandな性質を示す。100Hz付近の低周波数側のピークは, 0° 付近では明確でないが, 高周波数側のピークが明確でなくなる 3° 付近からピークが現れ, 8° を超えるあたりから, ピークが鋭くなるとともに高調波のピークも明確になる。迎角の正負による違いは特に見られなかった。

100Hz付近の低周波数域側にあるピークと, 200Hz付近の高周波数域側にあるピークを分けて, 図-18, 図-19に St 数を, 図-20, 図-21に音圧レベルを示す。低周波数域側のピークは $\alpha\approx 9^\circ$ で最大値となり, $\alpha\approx 20^\circ$ で極小値となる。高周波数域側のピークは $\alpha=0^\circ$ で最大値となる。 $\alpha=9^\circ$ 以降のピークは図-20で示したピークの2次高調波である。 $\alpha>30^\circ$ の予測値と測定値の差異は, 15m/sの空力音の発生周波数が低

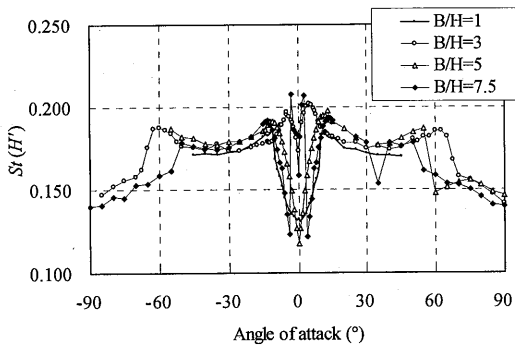


図-22 St 数の迎角による変化, 高周波数域のピーク ($B/H=7.5$)

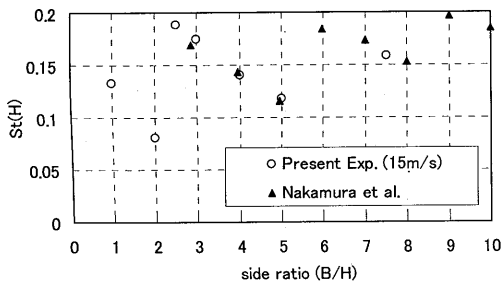


図-23 辺長比によるストローハル数の変化 (Nakamura et al.²⁷⁾)

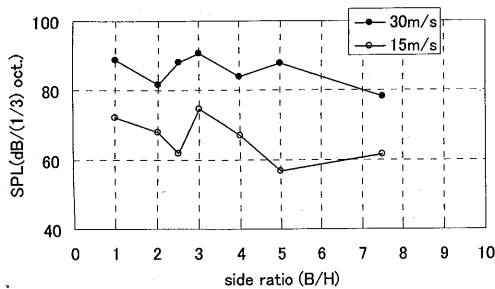


図-24 辺長比による音圧レベルの変化

く暗騒音の影響を受けていることが原因と考えられる。

(4) 見付幅を代表長さとした St 数の変化²³⁾

すべてケースについて、代表長さとして流れ方向の見付幅 H を用いたストローハル数 $St(H)$ の迎角による変化を図-22に示す。ここでは、いずれの辺長比においても、中間の迎角範囲(約 $15^\circ \sim 60^\circ$)では、ストローハル数 $St(H)$ は約0.17で一定である。この場合の流れ場は、前縁とそれと反対側の側面の後縁から渦が交互に放出される alternate-edge vortex shedding (AEVS) に対応すると考えられる。迎角 0° 付近の変化は辺長比によって異なる傾向を示している。

$B/H=1, 3, 5$ においては、 St 数が急激に変化する場合も連続的に変化するのに対して、 $B/H=7.5$ においては $\alpha \approx 2^\circ$ に St 数のジャンプが見られる。図-17に示したように $\alpha \approx 2^\circ$ 付近で2つのピークが見られるがどちらも不明瞭である。これは、 $\alpha=0^\circ$ において辺長比を変化させたときに $B/H \approx 3$ および 6 で St 数のジャンプが生じる際に、 $B/H \approx 6$ 近傍ではピークが不明瞭になる範囲があること²⁴⁾と対応した結果であると考えられる。

(5) 音圧レベルが最大となる迎角

音圧レベルがピークとなる迎角は辺長比によって異なるものとなった。 $B/H=3, 5, 7.5$ については最大値をとる迎角は 0° , 約 5° , 約 9° となる(図-13, 図-16, 図-20)。最大値の大きさは風速 15m/s で $70 \sim 80\text{dB}$, 30m/s で $90 \sim 95\text{dB}$ の範囲にあり、それぞれの辺長比における迎角による音圧レベルの変化が 20dB 程度あるのに比べてその変動幅は小さい。

Norberg²⁵⁾は、迎角を 0° から増加させたときに揚力係数が減少して初めて極小値をとる迎角を再付着が生じる迎角 α_R として定めている。それによると、 $B/H=1$ では Re 数が 5×10^3 のとき 12.6° , Re 数が 1.3×10^4 のとき 11.3° である。この値は、空力音が極小値をとる迎角にほぼ一致する。

ここで上記の定義と同様に、迎角を 0° から増加させたときに揚力係数が増加して初めて極大値をとる迎角を α_R として定めることにすると、既往の静的揚力係数の実験値から $B/H=3$ では $\alpha_R \approx 5^\circ$ となり^{25), 26)}, $B/H=5$ では $\alpha_R \approx 7^\circ$ となる²⁶⁾。これらの値は、空力音が最大値をとる迎角より大きめの値となっているが、何らかの関連性があると考えられる。すなわち、静的揚力係数が極値となる迎角および空力音が最大値となる迎角はともに、負圧面側の前縁剥離流が後縁に非定常再付着する流れ場から完全剥離する流れ場に移るときの状態に対応していると予想される。今後、流れの可視化や表面変動圧力の測定等を行い、より詳しく検討していく必要がある。

(6) 辺長比による空力音特性の変化

迎角 0° の場合の辺長比による空力音特性の変化について示す。なお、グラフには $B/H=2, 2.5, 4$ の結果も加えてある。

図-23に St 数の変化を示す。Nakamuraら²⁷⁾が変動風速から求めた St 数の結果も示してある。Nakamuraらは迎角 0° の矩形柱について、抗力係数や後流渦の St 数などの静特性が、辺長比によって異なることを示した。以下にその内容について述べる。Nakamuraらは迎角 0° において B/H を3から16まで1ずつ増加さ

せて実験を行い、放出渦の St 数（代表長さは流れ方向長さ B ）は階段状に変化することを示した。 $B/H=3\sim 5$ のときは、 $St(B)\approx 0.6$ であり、それより大きい B/H では0.6の整数倍で階段状に増加し、 $B/H=16$ ではスペクトルは広帯域になり明確なピークは現れなくなる。これらの変化は、剥離せん断層の再付着現象と深く関わっており、辺長比 $B/H=3\sim 5$ の範囲が周期的再付着に対応し、それより大きい範囲では完全に再付着になる。また $B/H=3$ より小さい範囲では完全に離型断面になる。これに関連して岡島²²⁾は B/H および Re 数をより詳細に変化させて実験を行い、完全剥離流れから周期的再付着流れへ移行する B/H の値は Re 数によって異なりおよそ2.5~3の間であり、また $B/H\approx 6$ において周期的再付着から定常的再付着に移ることを示した。

図-23に示すように、本実験で得られた空力音の St 数はNakamuraらの実験結果と良く一致している。また音圧レベルは図-24に示すように風速15m/sと30m/sで若干傾向が異なるが、いずれも $B/H\approx 2, 5$ で小さくなる傾向が見られる。 $B/H=2, 5$ ともに流れの状態が変化する直前の辺長比であり、そのような遷移状態において規則的な渦の生成が弱まるものと考えられるが、このような流れの詳細と空力音の発生メカニズムの検討は今後の課題である。

4. 結論

低騒音風洞と暗騒音を小さくするためのいくつかの実験装置を構成し、2次元物体から発生する空力音の基本的特性を検討した。4種類の辺長比の矩形柱を対象として、風速15m/sと30m/sにおいて迎角を変化させて発生する空力音を測定し、その基本的特性の変化について調べ、考察を加えた。以下に得られた結果をまとめる。

- いずれの辺長比においても迎角の正負で基本周波数およびその大きさに違いは見られなかった。ただし、 $B/H=1$ の場合に再付着が生じる側面側において高調波成分が大きくなる傾向が見られた。
- 2種類の風速における空力音のピークストローハル数はほとんどのケースでほぼ等しかった。音圧レベルはほとんどの場合、風速の6乗則を満足するものであったが、 $B/H=5$ の $\alpha=0^\circ$ において10dB以上の増加が見られた。
- Curleの式を用いて実験条件の違いを補正し、 $B/H=1$ について既往の測定との比較を行ったところ、多くの迎角において数dB程度の違いであった。

- 音圧レベルが極値をとる迎角は辺長比によって異なり、再付着断面である $B/H=3, 5, 7.5$ については、 $\alpha=0^\circ, 5^\circ, 9^\circ$ で最大値をとる。完全には離型断面である $B/H=1$ については、 $\alpha=0\sim 2^\circ$ の間で最大値をとり、特に $\alpha=2^\circ$ でスペクトルのピークが鋭くなる。最大値の大きさは風速15m/sで70~80dB、30m/sで90~95dBの間にあり、各々の辺長比における迎角による音圧レベルの変化に比べてその変動幅は小さい。

参考文献

- 1) 須田健一, 吉岡清: 超高層集合住宅における風騒音の実測, 第13回風工学シンポジウム, pp. 95-100, 1994
- 2) Kimura, K., Fujino, Y. and Hiejima, S.: An experimental study on aerodynamic noise from handrails of flat plate cascades, *Proc. 9th Int. Conf. Wind Eng.*, Vol. 5, pp. 49-56, 1995
- 3) 三陸国道工事事務所: 橋梁高欄の騒音実験について, 建設月報とうほく, 11月号, pp. 382-385, 1986
- 4) Lighthill, Sir M.J.: On sound generated aerodynamically; I General theory, *Proc. Royal Soc.*, Vol. A211, pp. 564-587, 1952
- 5) Curle, N.: The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound, *Proc. Roy. Soc. A*, Vol. 231, pp. 505-514, 1955
- 6) Leehey, P. and Hanson, C.E.: Aeolian tones associated with resonant vibration, *J. Sound Vib.*, Vol. 13, No. 4, pp. 465-483, 1971
- 7) 山田彰二, 藤田肇, 丸田芳幸, 槇浩幸, 白石純一: 二次元モデルから発生する空力騒音の実験的研究, 第2報, 円柱の傾斜角度と角柱の迎え角の発生音への影響, 日本機械学会論文集 (B編), 63巻, 610号, pp. 1974-1979, 1997
- 8) Fujita, H., Sha, W., Furutani, H. and Suzuki, H.: Experimental investigations and prediction of aerodynamic sound generated from square cylinders, AIAA-98-2369, pp. 942-947, 1998
- 9) 青木誠, 石原国彦: エオルス音の予測に関する研究, 日本機械学会論文集 (B編), 65巻, 636号, pp. 2748-2754, 1999
- 10) 小川隆申, 嶋田健司: 角柱まわりの流れから発生する流体音の数値解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 1997
- 11) 比江島慎二, 松尾綾子, 谷口建男: 矩形表面上の空力音音源特性に関する数値流体解析, 第16回風工学シンポジウム, pp. 161-166, 2000
- 12) 中藤誠二, 黒田直樹, 木村吉郎, 藤野陽三, 小川隆申: 2次元円柱から発生する空力音の測定, 日本風工学会誌, Vol. 79, pp. 101-102, 1999
- 13) 藤田肇, 白石純一, 栗田健, 丸田芳幸, 山田彰二: 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, 日本機械学会論文集 (B編), 62巻, 593号, pp. 187-193, 1996
- 14) Keefe, R.T.: An investigation of the fluctuating forces acting on a stationary circular cylinder in a subsonic stream, and of the associated sound field, *UTIA Report*, No. 76, 1961
- 15) 飯田明由, 藤田肇, 加藤千幸, 大田黒俊夫: 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, 日本機械学会論文集 (B

- 編), 62巻, 604号, pp. 4160-4167, 1996
- 16) 大築志夫, 藤井邦雄, 鷺津久一郎, 大屋昭男: 一様流中におかれた二次元静止矩形柱の空力3分力特性と圧力分布について, 第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム, pp. 169-176, 1978
 - 17) 五十嵐保: 正方形柱まわりの流れ特性, 日本機械学会論文集 (B編), 50巻, 449号, pp. 210-218, 1984
 - 18) Taylor, I. and Vezza, M.: Prediction of unsteady flow around square and rectangular section cylinders using a discrete vortex method, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 82, pp. 249-269, 1999
 - 19) 松本勝, 白土博通, 島原明, 石崎發雄: 風の傾斜角による断面辺長比2:1角柱の空力特性, 第15回風工学シンポジウム論文集, pp.287-292, 1998
 - 20) 白土博通, 松本勝, 本間信治郎: 迎角による断面辺長比0.5二次元矩形断面の空力特性変化, 日本風工学会誌, No. 79, pp. 139-140, 1999
 - 21) Phillips, O.M.: The intensity of aeolian tones, *J. Fluid Mech.*, Vol. 1, No. 6, pp. 607-624, 1956
 - 22) 岡島厚: 種々な断面辺長比の矩形柱周りの流れ, 日本風工学会誌, 第17号, pp. 1-19, 1983
 - 23) 中藤誠二, 木村吉郎, 高尾忠志, 藤野陽三, 小川隆申: 矩形柱から発生する空力音の特性と変動圧力分布の関係, 土木学会第55回年次講演会概要集, 2000
 - 24) Parker, R. and Welsh, M.C.: Effects of sound on flow separation from blunt flat plates, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 4, pp. 113-127, 1983
 - 25) Norberg, C.: Flow around rectangular cylinders: Pressure forces and wake frequencies, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 49, pp. 187-196, 1993
 - 26) 中村泰治, 溝田武人, 吉村健: 矩形柱およびH型断面柱の空力3分力特性について, 九州大学応用力学研究所報, 第40号, pp. 245-255, 1973
 - 27) Nakamura, Y., Ohya, Y., and Tsuruta, H.: Experiments on vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges, *J. Fluid Mech.* Vol. 222, pp. 437-447, 1991

(2001. 2. 7 受付)

CHARACTERISTICS OF AERODYNAMIC SOUND FROM RECTANGULAR CYLINDER WITH VARIOUS SIDE RATIOS

Seiji NAKATO, Kichiro KIMURA, Yozo FUJINO,
Takanobu OGAWA and Takeshi ISHIHARA

Aerodynamic sound radiated from rectangular cylinder with side ratio $B/H=1, 3, 5$ and 7.5 was studied experimentally in a low-noise wind tunnel at wind speed 15m/s and 30m/s . Peak Strouhal number is almost same at different speed, and increment of sound pressure level (SPL) is corresponding to U^6 law. Angle of attack where SPL had peak value was $\alpha \approx 2^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 9^\circ$ with $B/H=1, 3, 5, 7.5$ respectively, but peak value is almost same. On the other hand, variation range of SPL with different angle of attack is about 20 dB for each case. The present data was compared with existing data by adjusting difference in experimental condition with Curle's equation.