

2次元柱および平板列からの空力音特性および その発生メカニズムに関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON AERODYNAMIC SOUND CHARACTERISTICS
AND MECHANISM FROM CYLINDER AND FLAT PLATE CASCADE

中藤誠二¹⁾

木村吉郎²⁾

藤野陽三³⁾

石原孟⁴⁾

Seiji NAKATO¹⁾, Kichiro KIMURA²⁾, Yozo FUJINO³⁾ and Takeshi ISHIHARA⁴⁾

ABSTRACT

Aerodynamic sound occurred from structures in strong wind became problem. It is important to develop database of characteristics of aerodynamic sound from basic structural member. In this study, aerodynamic sound from cylinder and flat plate cascade is investigated experimentally with low-noise wind tunnel. For aerodynamic sound from square cylinder, frequency is maximum at angle of attack 12°, minimum at 4° and SPL has characteristics of narrowband random vibration. For plate cascades, peak frequency increases step-by-step with the increase of wind speed and it occurred at least with 8 plates.

Key Words: Aerodynamic sound, Aeolian Tone, Sound Pressure Level, Peak Frequency

1. はじめに

マンションが高層化するとともに、近年は臨海部の開発が盛んに行われており、その結果、常に高い風速が構造物に作用していることになり、空力騒音問題の増加が懸念される。また、通信用アンテナなど、ビルの屋上など風の強いところに構造物が設置されることも多くなり、空力騒音源となる可能性のある構造物は増加していると考えられる。これらの対策は、問題発生後に試行錯誤的に行われることが多いが、設計段階で考慮されることが望ましく、そのためには空力音の特性やその発生メカニズムに関する基礎的な実験データを充実させていく必要がある。また、数値流体解析を空力音の予測手法として用いる研究も多く行われているが、その実用化のためには詳細な実験データによる検証が不可欠である。

基本的な構造部材である円柱や角柱など2次元柱から発生する空力音については、数値流体解析と Curle の式を組み合わせた解析が試みられている^{1),2),3)}。しかしながら、音圧レベルの実験値との検証には相関長さの評価などの課題を残しており、また、実験ではピーク近傍の周波数成分にもパワーを持つような周波数特性が得られるのに対して、純音に近い音が計算値として得られる傾向にある。

一方、平板列から発生する空力音については、プラントにおける熱交換器などのダクト内に流れに垂直に設置された平板列の場合、カルマン渦放出と音響定在波が連成し、非常に強い音が発生することが知られている⁴⁾。しかしながら、橋梁の高欄やベランダの手すりのように開放された流れ場におかれた平板列を対象とした実験では、流れに垂直な方向では空力音が発生せず、迎角のあるときに主に空力音が発生する。エッ

1) 関東学院大学工学部 助教授 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東 1-50-1)

2) 九州工業大学工学部 助教授 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

3) 4) 東京大学大学院工学系研究科 教授 助教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

ジトーン的なメカニズムで発生していると考えられるが、どのような条件で発生するかについては不明な点も多い。平板列についても数値流体解析による検討が行われているが、空力音の再現には至っていない^{5),6)}。また、周期境界条件が用いられる場合に何枚の平板を対象に計算をすれば現象の再現に十分であるか明らかではない。

著者らは、これまで構造物を構成する円柱や矩形柱などの棒状部材から発生する空力音について低騒音風洞を用いて実験的な研究を行ってきた。本研究では、これまで十分に検討されていない2次元柱および平板列から発生する空力音の周波数特性、およびその発生メカニズムに着目して風洞実験を行い考察を行った。

2. 2次元柱から発生する空力音

(1) 風洞実験による測定結果

2次元柱から発生する空力音である、カルマン渦に起因するエオルス音について、正方形角柱を対象に実験を行った。低騒音風洞の開放型測定部において、1辺20mmの正方形角柱から発生する空力音を測定した。模型長さは1800mmであり、アスペクト比は90である。吹き出し部は高さ1800mm、幅1000mmであり、風速は15m/sとした。風が直接当たらない模型側方3.2mにおいてコンデンサマイクロホンで音圧を測定した。サンプリング周波数は50kHzで20秒間測定した。

音圧レベルのスペクトルの例として、風速15m/s、迎角0°のものを図1示す。ピーク周波数と音圧レベルを図2に示す。なお、音圧レベルのパワースペクトルはピーク周波数の近傍にもパワーを持つ狭帯域不規則振動の特徴を持つことから、ピーク周波数を中心とした1/3オクターブの範囲のパワーを足し合わせた値で示している。これは、FFTを用いた定幅型の周波数分析において高周波数側に行くにしたがって値がばらつく影響を小さくする効果もある。また、数値流体解析で空力音を求める際に、計算対象時間が実験より短い場合には分解能が粗くなってピークを十分な密度ではとらえられていない場合があるが、このような方法で音圧レベルを求めることでばらつきが小さくなると思われる。

迎角0°のときのストローハル数は $St = 0.133$ で、西村らの結果⁷⁾ $St = 0.126$ より大きくなっている。迎角-12°, 12°で最大値となり、それぞれ $St = 0.156, 0.155$ となっている。また、迎角-4°, 4°においてピーク周波数が極小値を取っている。迎角0°において側面の長さを短くしたとき、辺長比0.6付近でせん断層の巻き込み位置が角柱にもっとも近づいて抗力が最大となるが、同様に迎角4°付近での現象も、巻き込みが強くなって強いカルマン渦が形成され、渦間隔が広がることで周波数が低下しているものと思われる。

なお、空力音のピーク周波数の迎角による変化は、変動揚力や変動圧力、後流の変動風速など他の流れ場の測定による値よりも、ばらつきが小さい傾向にあると思われる。高周波数であるので模型の固有振動数などの影響を受けない、物体近傍の複雑な流れ場による局所的な影響を受けないことが理由として考えられる。一方、音圧レベルも理論的にはグラフ

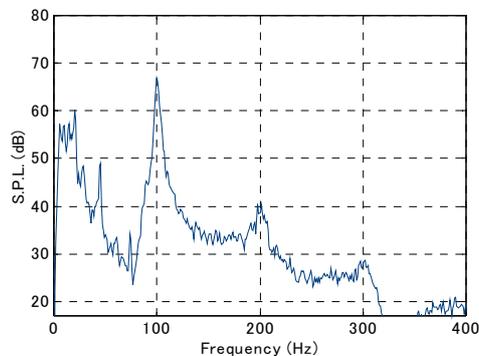


図1 音圧レベルのパワースペクトル

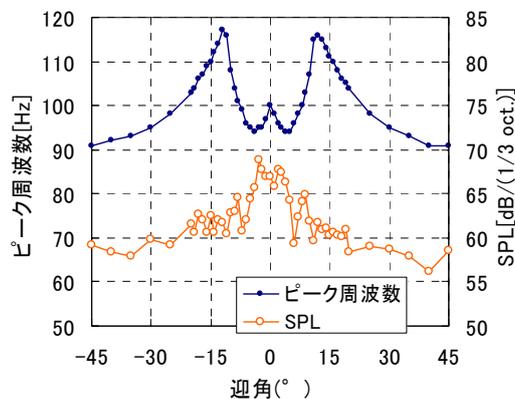


図2 ピーク周波数と音圧レベル

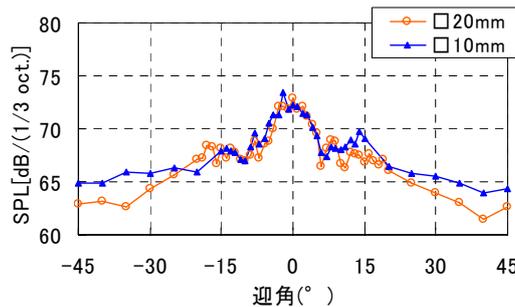


図3 大きさの異なる正方形角柱から発生する空力音の音圧レベル

は迎角 0° を中心に左右対称となるが、測定値にばらつきが見られ、測定室の音響モードや模型端部などの実験条件が与える影響が大きいものと思われる。

図 3 に、既往の研究における一辺の長さ 10mm の角柱のから発生する空力音の音圧レベル⁸⁾と合わせて示す。迎角による変化の傾向はほぼ一致しており、大きさもほぼ同程度あるいは 20mm の方が小さい結果となっている。

2次元柱から発生する空力音については、Lighthill の音響方程式の固体面のある場合の定式化である Curle の式によって音圧レベルは次のように表される。

$$SPL = 10 \log_{10} \left(\overline{p^2} / p_0^2 \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\cos^2 \theta}{16c_0^2 r^2} St^2 C_L^2 L L_C \rho_0^2 U^6 / p_0^2 \right) \quad (1)$$

ここで $\overline{p^2}$: 音圧の二乗平均値, p_0 : 基準音圧 (2.0×10^{-5} 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。なお、式(1)から具体的に音圧レベルを求めるためには C_L , L_C , St の値を実験や数値流体解析で求める必要があるが、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 (6 乗則) などの性質が得られる。今回、物体表面の面積は 2 倍になっているが、この影響は St 数の中に含まれており、周波数が半分となることと打ち消しあう。流れ場の相似を仮定すると 20mm の正方形柱において相関長さ L_C が 2 倍になり、式(1)から音圧レベルは理論的には 3dB 増加することになる。ただし、Curle の式で表される要因以外にも、前述の実験条件が音圧レベルに与える影響も大きく、図 3 の結果は、Curle の式が成り立たないことを示すものではないと考えられる。

(2) 2次元柱から空力音の減衰特性

図 1 のように発生する空力音は、狭帯域不規則振動の特性を示す。そこで、構造物の常時微動データから振動特性を同定するために用いられる手法を応用することとし、ここでは、模型軸方向に相関長さ程度のスケールのカルマン渦が発生して、やがて弱くなるような渦列の模型軸方向の集合がエオルス音として観測されていると考え、空力音の時系列データから自由振動波形を求め、減衰定数を求めることとした。

自由振動波形は、線形システムを対象とする自己相関関数法を用いて求める⁹⁾。ここでは、暗騒音が着目する空力音と同程度である 50Hz 以下のパワースペクトル密度を 0 としたものを逆フーリエ変換して自由振動波形を求めた。自由振動波形から減衰定数を求める際には ERA 法を用い^{10),11)}、その際、ハンケル行列の大きさは (2000×1000) とした。自由振動波形の初めの 3000 個のデータを用いることとなり、今回 50kHz のサンプリングでピーク周波数が 100Hz 前後であるので、約 6 波の自由振動波形から同定していることになる。得られた減衰定数を用いて包絡線を描いたものを図 4～図 5 に示す。得られた減衰定数が妥当であることが分かる。

図 6 に 1 辺 20mm の正方形角柱から発生する空力音の減衰定数を示す。なお、ERA 法で得られたピーク周

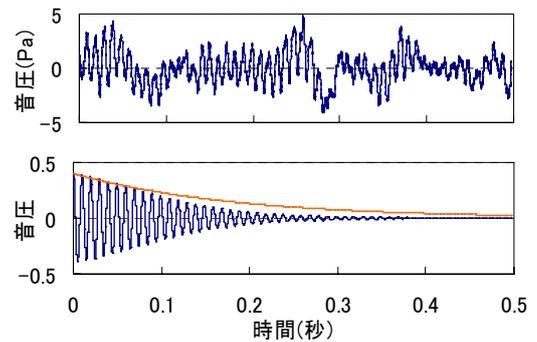


図4 迎角 0° の時の音圧の時系列波形の一部(上)と自由振動波形と包絡線(下)

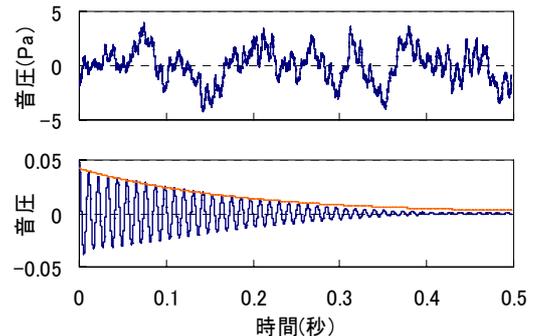


図5 迎角 45° の時の音圧の時系列波形の一部(上)と自由振動波形と包絡線(下)

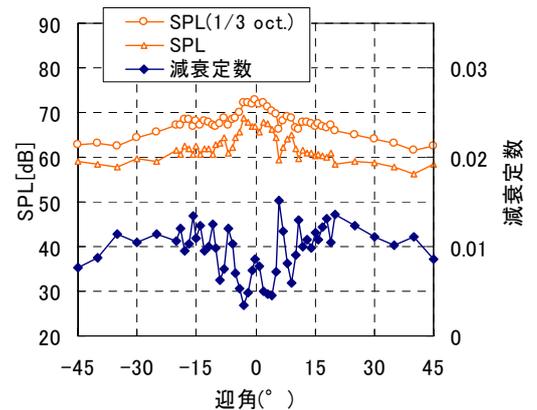


図6 1 辺 20mm の正方形角柱から発生する空力音のピーク周波数と減衰定数

波数はパワースペクトルのピークと一致している．減衰定数は約 0.5%～1.5% となり，音圧レベルの高い 0° 近傍の迎角で比較的小さくなる傾向にある．音圧レベルの変化との対応を見ると，パワースペクトルと自己相関関数の関係から明らかではあるが，1Hz あたりピーク音圧レベルが小さい迎角 -7°，6° では，減衰定数が大きくなっている．反対に，1Hz あたりピーク音圧レベルが大きい迎角 -3°，2° では，減衰定数が小さくなっている．

1 自由度の減衰自由振動において，相つづく極大値の振幅比は減衰定数を ζ とすると

$$\frac{x(t_i)}{x(t_{i+1})} = e^{\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (2)$$

となる．したがって，音圧の振幅が半分になる時間（音圧レベルで 6dB の減少）は

$$T_{1/2} = \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{2\pi\zeta} \times \ln 2 \times \frac{1}{f} \quad (3)$$

で求められる．ここで f : 空力音の周波数である．図 6 の減衰定数を当てはめると，半減時間は 0.05 秒～0.35 秒程度となり，周波数を 100Hz とすると 5 波から 35 波程度となる．アスペクト比の大きい 2 次元柱では，相関長さ程度のスケールを持つカルマン渦が，軸方向の異なる位置で不規則に発生と減衰を繰り返し，それらをアンサンブル平均したのものとして遠方場の空力音が生じるため，純音とは異なるゆらぎの伴った”ボー”という音に聞こえるものと推察される．

3. 平板列から発生する空力音

(1) 風洞実験による測定結果

平板列を対象に低騒音風洞を用いて空力音の測定を行った結果を示す．実験手法は，2 次元柱の場合と同じであるが，マイクロホンは模型中心より真横の 2.5m の位置に設置し，また，対象とする空力音の周波数が高いためサンプリング周波数は 100kHz とした．実験に用いた平板列模型は文献 12 で用いられているものであり，厚さ 3mm，幅 70mm，高さ 600mm の平板を 50mm 間隔(中心間隔 53mm) で 7～10 枚並べた模型を用いた．模型は，鋼製の枠によって支持されている(図 7)．平板 8 枚，迎角 60° のときの音圧レベルのパワースペクトルを風速 8.6m/s と 19.0m/s について図 8 に示す．1kHz 以上の範囲で純音に近いピークが発生しており，正方形柱の場合と同様に減衰定数を求めたところ，それぞれ 1.09×10^{-4} ， 9.18×10^{-5} と非常に小さい値となった．図 9 にピーク周波数，音圧レベルの風速による

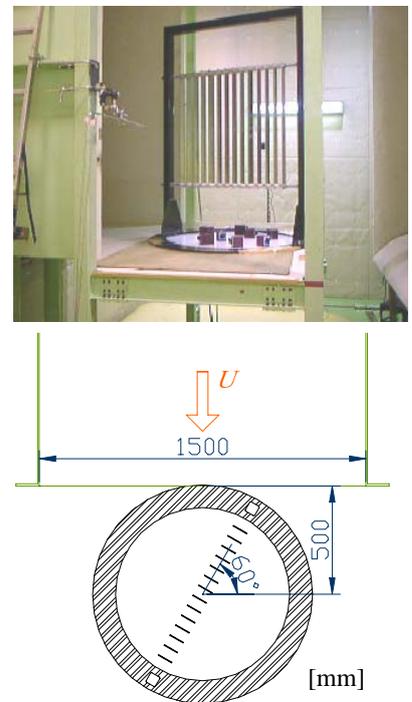


図 7 平板列模型の設置状況と平面図

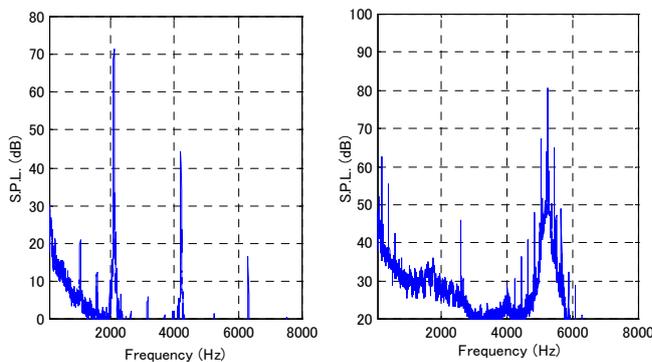


図 8 音圧レベルのパワースペクトル 8.6m/s(左)，19.0m/s(右)

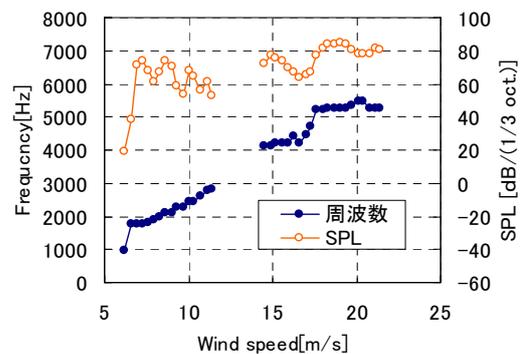


図 9 ピーク周波数と SPL，平板枚数 8 枚

変化を示す。グラフでは分かりにくいが高風速域(6~12m/s)では段階的にピーク周波数が変化し、風速 12~13m/s では空力音はほとんど聞こえなくなり、13m/s 以上では約 2 倍程度の高周波数の空力音が発生し、その後周波数はほぼ一定となった。

平板で囲まれた空間内の定在波の周波数は次のように表される。

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (4)$$

ここで、 c : 音速, L_y : 平板列の間隔(50mm), L_z : 平板列の高さ(600mm), $n_y, n_z=0,1,2,\dots$ である。 $n_y=1$ としたときの周波数を表 1 に示す。 L_y を測定値に合うように 0.095m としたとき、低風速域の周波数に良く一致している。これは平板間の対角の長さ 0.086m に近い値であることから、対角方向に音響モードが生じていることが考えられる。

迎角を変化させて実験を行ったところ、迎角 $50^\circ \sim 70^\circ$ の範囲で空力音が発生した。枚数を変化させた場合には、10 枚のときは 8 枚のときと同じような傾向を示すが、7 枚では低風速域において空力音の発生が見られなかった。これは、次節で述べるような空力音発生のための流れ場となっていないためと思われる。

(2) 形状のわずかな変化による空力音特性の変化

平板の前縁に図 10に示すように樹脂製のカバーを高さ方向 600mm 全長に渡って取り付け、平板列(8 枚)について同様の実験を行った。図 11に上流側 4 枚に前縁カバーを取り付けた場合、下流側 4 枚に前縁カバーを取り付けた場合、全てに前縁カバーを取り付けた場合のピーク周波数、音圧レベルの変化をそれぞれ示す。上流側 4 枚の場合、カバーのないケース(図 9)と大きな違いは見られない。下流側 4 枚の場合、低風速域の空力音の発生が抑えられている。全てに取り付けた場合は、発現風速が全体的に高風速側に移動している。例えば 2400Hz 付近の空力音を生じる風速が、前縁カバーのない場合は 10.0m/s となるのに対し、全てに取り付けた場合は 18.7m/s となる。カバーをつけても定在波の周波数はほとんど変化しないと考えられることから、前縁上流側端部で剥離した渦が、3mm 離れた下流側端部へ再付着しフィードバックする現象が発振源と考えられる。剥離流れの移流速度を風速の 0.6 倍として発生周波数を求めると、風速 10m/s、厚さ 3mm のとき $f=2000\text{Hz}$, $U=18.7\text{m/s}$, 厚さ 5mm のとき $f=2244\text{Hz}$ となり、実験で得られているの 2400Hz と近い値となっている。

以上の結果より、上流側の平板列によって接近流の向きが端部に沿う方向に変わり、下流側の平板列において端部で再付着流れが生じるようなときに空力音が発生するものと推察される。

(3) 高欄から発生する空力音の実測

神奈川県内の橋梁の高欄から、強風時に発生する空力音を測定した(図 12)。高欄の平板は厚さ 10mm、幅

表 1 定在波の周波数

n_z 次	理論値 $L_y=0.05$	理論値 $L_y=0.095$	測定値
0	3400	1789	1764
1	3412	1812	1813
2	3447	1877	1884
3	3505	1981	1986
4	3584	2118	2106
5	3683	2282	2259
6	3801	2468	2425
7	3936	2671	2609
8	4086	2888	2793
9	4250	3115	発生せず

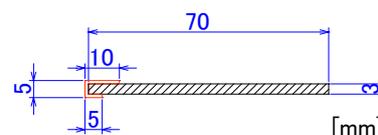


図 10 カバーを取り付けた平板の断面形状

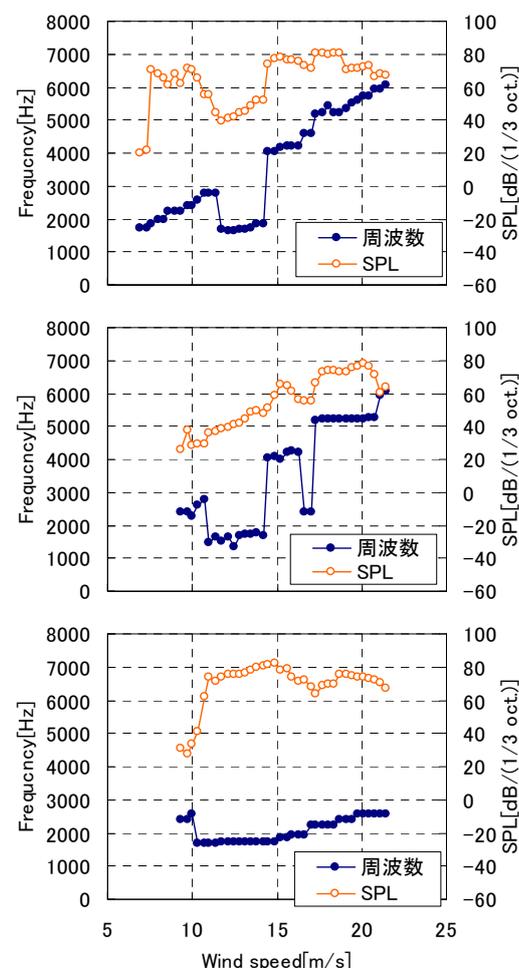


図 11 ピーク周波数と SPL, 上流側 4 枚(上), 下流側 4 枚(中), 8 枚すべて(下)

60mm, 高さ 820mm, 間隔 164mm で, 支柱間に 13 枚ある. サンプル周波数は 8kHz, 記録時間は約 1 分間で, 一部, オーバーレンジしている (図 13). パワースペクトルを図 14 に示す. マイク自身の風切り音が強く, また高欄からの空力音も間欠的に発生していたが, 1755Hz のところに明確なピークが見られる. この周波数に対応する音波の波長は約 194mm で, 間隔 164mm に近い値となる. ただし, 段階的に周波数が増加する傾向は見られなかった. 今後, 他の形状の高欄も含めて実験, 実測を行い, 前述の発生メカニズムの検証をしていく必要がある.

なお, 手すりや有孔パネルなど, 構造物では同じ形状のものが並べて用いられることが多いが, 空力騒音の観点から考えると, 空力音の発生条件が同じになり, 音圧レベルが増加することになる. 同じ音源が 2 つあると音圧レベルは 3dB 増加し, 音が大きくなったと認識できるレベルとなることから, 空力騒音対策としては, ある程度不規則に寸法を変化させていくことが有効であると考えられる.

4. まとめ

正方形柱および平板列から発生する空力音について, その特性と発生メカニズムについて風洞実験により検討し, 以下の結果が得られた.

- ・正方形柱から発生する空力音の周波数は迎角 12°で最大値となり, 迎角 4°で極小値となる.
- ・狭帯域不規則振動的な特徴を持っており, 減衰定数を求めたところ 0.5~1.5%となった.
- ・平板列から発生する空力音は, 平板間の定在波に対応して低風速域において段階的に周波数が増加する.
- ・空力音が生じるためには 8 枚以上必要である.
- ・平板前縁上流側端部で剥離した流れが下流側端部に再付着することが発振源と考えられる.

今後さらにデータを蓄積し, 効果的な空力騒音の予測と対策につながるよう, 実験結果をまとめていく必要がある.

参考文献

- 1) 加藤千幸, 高野靖, 飯田明由, 藤田肇, 池川昌弘: LES による流体音の予測, 第 1 報, 二次元円柱からの放射音, 日本機械学会論文集 (B 編), 60 巻, 569 号, pp.126-132, 1994
- 2) 六郷彰, 山本浩輝, 岡島厚, 塩谷篤, 木村繁男, LES によるブラフボディから発生する流体音の数値解析, 第 18 回数値流体力学シンポジウム論文集, B3-1, 2004
- 3) 鈴木雅靖, 田村哲郎, 朝比奈辰樹, 高久勝彦: 2 次元角柱から発生する空力音に関する研究 —剥離再付着流れの場合—, 第 17 回風工学シンポジウム論文集, pp.95-100, 2002
- 4) 社団法人日本鋼構造協会編: 構造物の耐風工学, pp.486-487, 東京電機大学出版局, 1997
- 5) 木村吉郎, 山内洋志, 藤野陽三: 空力音発生に着目した平板列周りの数値流体解析, 日本風工学会誌, vol. 71, 1997, pp. 203-204
- 6) 丸岡晃, 平野廣和, 志村正幸: 空力音の発生を考慮した多角柱列まわりの流れの 3 次元流体解析, 土木学会第 54 回年次学術講演会, pp.758-759, 1999
- 7) 西村宏昭, 谷池義人: 二次元静止正方形角柱の変動空気力特性, 第 16 回風工学シンポジウム論文集, pp.255-260, 2000
- 8) 中藤誠二, 木村吉郎, 藤野陽三, 小川隆申, 石原孟: 種々の辺長比を持つ矩形柱から発生する空力音特性, 土木学会論文集, No. 696, pp. 145-155, 2002.1
- 9) 日本建築学会編: 建築物の減衰, 4 章 実測による建築物の減衰定数の推定法, 丸善, 2000
- 10) Jer-Nan Juang: Applied System Identification, Prentice Hall PTR, 1994.
- 11) 長山智則, 阿部雅人, 藤野陽三, 池田憲二: 常時微動計測に基づく非比例減衰系の非反復構造逆解析と長大吊橋の動特性の理解, 土木学会論文集, No.745, pp.155-169, 2003
- 12) 比江島慎二, 島田隆一, 木村吉郎, 藤野陽三, 野村卓史: 平板列で構成される高欄に生じる空力音に関する実験的研究, 日本風工学会誌, No. 55, pp. 111-112, 1993



図 12 実測対象橋梁の高欄

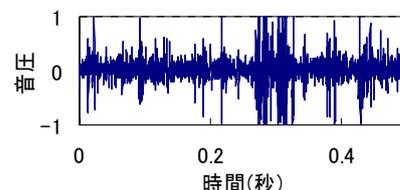


図 13 空力音の時系列波形の一部

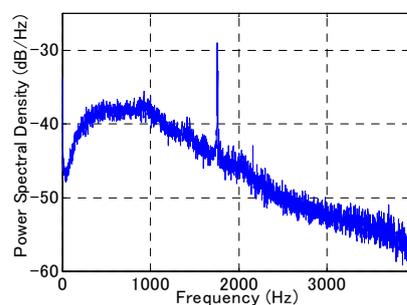


図 14 空力音のパワースペクトル