平行 2 円柱から発生する空力音と流れ場への直交円柱の影響*

前田 幸成^{*1}, 林 芳成^{*2}, 北村 敏也^{*3}, 宮田 勝文^{*4}

Effects of Cross Cylinders on Aerodynamic Sound from Two Parallel Circular Cylinders

Yukinari MAEDA^{*1}, Yoshinari HAYASHI, Toshiya KITAMURA and Masafumi MIYATA

^{*1}Graduate Student, University of Yamanashi, Department of Mechanical Systems Engineering
Takeda 4-3-11, Kofu, Yamanashi, 400-8511 Japan

Wire net often generates aerodynamic sound under some conditions in uniform flow. We simplified it by two parallel circular cylinders with cross cylinders. Separation of two parallel cylinders are four times the diameter. The effect of cross cylinders placed either at the upwind or downwind sides of two parallel cylinders are examined for various pitches ($p_z/d_x=4\sim32$) and angles of attack. With cross cylinders placed upwind, aerodynamics sound becomes intense in any pitch. But placed downwind, aerodynamics sound becomes weaker as the cross cylinder's pitch become narrower. Finally when separation of two parallel cylinders is equal to cross cylinder's pitch like a wire net, it doesn't generate noticeable sound. Measurements of the mean velocity field by LDV show that cross cylinders tend to elongate recirculation region of the upstream cylinder and to make the point of vortex roll up backward, leading to a weaker aerodynamic sound.

Key Words : Aerodynamic Sound, Cylinder Array, Aeolian Tone, Wire Net, Karman Vortex, Laser Doppler Velocimeter, Recirculation Region

1. 緒 言

金網状構造物は防風フェンスや建築物の景観用スクリーンとして様々な場面で用いられている。しかし、特定の条件において金網状構造物からは空力音が発生し、騒音問題になることがある。特に、居住空間に隣接する場合には防風や景観の効果と共に静粛性も要求される。そのため金網状構造物から空力音が発生するメカニズムおよび、低減のための対策法が求められている。

開口率 0.6 程度の平織の金網を一樣流中に $10^\circ\sim20^\circ$ の迎え角をつけて設置すると、ストローハル数 $St=0.13\sim0.15$ 程度の強い空力音が発生する。この音は流れに垂直なワイヤーから放出されるカルマン渦が大きく寄与していることを確認した⁽¹⁾。

しかし、平織金網では LDV による部材円柱まわりの速度場の測定が困難なため、まず平行 2 円柱への単純化を試みた。平行 2 円柱から発生する空力音の迎え角や中心間距離（ピッチ）に対する変化および、音が強くなる条件は金網と同じ特徴を持っていることを確認した後、迎え角のついた平行 2 円柱から発生する空力音はピッチが円柱直径の約 4 倍、迎え角が 10° 付近で強くなることが明らかにされた⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

本研究では以上の結果を踏まえ、金網を平行 2 円柱とこれに直交する円柱列にモデル化し、平行 2 円柱のピッチを固定して迎え角、直交円柱のピッチ、取り付け位置に対し発生する空力音の特徴および速度場との関連について調べた。

*原稿受付 2011 年 9 月 30 日

^{*1} 学生員, 山梨大学大学院 医学工学総合教育部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

^{*2} 正員, 旭ビルウォール (株)

^{*3} 正員, 山梨大学

^{*4} 正員, 永年会員, 山梨大学

E-mail: g11mm032@yamanashi.ac.jp

2. 実験装置

出口寸法 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ の Eiffel 型低騒音風洞出口直後の流速 $U_0=16\text{m/s}$ の一様流中に供試物体を図 1 のように設置する. 測定部の SPL は試験体を設置しない状態で, 流速 16m/s で 62dB(A) であり, 本研究の目的には十分静かな風洞となっている. 平行 2 円柱および直交円柱には黄銅中実丸棒材を使用する. 平行 2 円柱直径 d_x および直交円柱直径 d_z はともに 5mm である. 図 2 のように, 一様流と平行 2 円柱の中心を結ぶ線がなす角を迎え角 α とし $0 \sim 90^\circ$ で任意に設定できるようになっている. 平行 2 円柱のピッチを p_x , 直交円柱のピッチを p_z とし, p_x は平行 2 円柱の実験において顕著な空力音が発生した条件である $p_x=20\text{mm}$ ($p_x/d_x=4$) で固定し, p_z を $20 \sim 250\text{mm}$ ($p_z/d_x=4 \sim 32$) の間で適宜変化させ, 各場合につき直交円柱を風上側 (図 2(a)) と風下側 (図 2(b)) に置く 2 パターンを設定した. 図中の赤色が平行 2 円柱であり, その前方に青色の直交円柱を設置する場合を「風上側」, 後方に設置する場合を「風下側」と呼ぶ. 騒音計マイクは風洞中心線から 650mm 程度離し, 平行 2 円柱の上流側円柱の設置位置に設置した. 空力音の騒音レベル (SPL) の測定および, FFT アナライザによるスペクトル解析を行った. 供試物体まわりの速度場の測定は 2 次元 LDV (DANTEC) を用い実施した. 検査体積は直径 0.2mm , 長さ 2.5mm であり, 解析ソフトは BSAFlow を用いた.

Fig.1 Experimental arrangement for SPL measurement.

Fig. 2 Flow geometry and coordinate system.

3. 実験結果

3・1 空力音の SPL と St

図 3(a)は直交円柱を風上側に加えた場合に発生する空力音の SPL の迎え角 α に対する依存性を示す. どの p_z においても迎え角 $\alpha=10^\circ$ 付近で SPL は最大値になり, その大きさは 5dB(A) の範囲に収まっている. 一方で直交円柱

Fig. 3 Dependence of SPL on α ($U_0=16\text{m/s}$).

を風下側に加えた場合を図 3(b)に示す. 直交円柱ピッチ p_z が小さくなるにつれ最大の SPL は減少し, その時の迎え角 α は大きくなっている. 特に, 実際の金網のように $p_x/d_x = p_z/d_x = 4$ の正方格子とした場合にはほとんど空力音は確認できず, 直交円柱がない時と比べて 10dB(A) 近く減少していることがわかる.

円柱から発生する空力音については, これまでの研究よりカルマン渦のスパン方向の相関長さが関係していることが分かっている⁽⁶⁾. 直交円柱を風下側に加えると, 風上側に比べ, 上流側円柱から放出されるカルマン渦をスパン方向に同期して巻き上がることを阻害するため, 空力音が低減していると考えられる. さらに p_z/d_x を 8 以下にすると SPL を低減する効果は大きくなる.

図 4 にパワースペクトルのピーク周波数から求めた St を示す. どの条件においても空力音が強くなる $\alpha = 10^\circ$ 付近で $St = 0.2, 0.4, 0.6$ に相当する音が発生している. これは本実験のレイノルズ数 $Re = 5300$ における一様流中の円柱によるカルマン渦放出の St として知られている 0.2 とその整数倍である. 平行 2 円柱から放出されるカルマン渦の周期は直交円柱の影響を受けないことを示している

Fig. 4 Dependence of St on α ($U_0 = 16\text{m/s}$).

3・2 顕著な空力音が発生する平行 2 円柱まわりの平均速度場

まず, 直交円柱のない平行 2 円柱の空力音が顕著な, $p_x/d_x = 4$, $\alpha = 10^\circ$ での平均速度ベクトル線図を図 5(a)に示す. この時, 上流側円柱後方に形成される再循環領域は単独円柱の時と比べて短く, $x/d_x = 1.5$ 付近で閉じている. 上流側円柱の後流は下流側円柱を避けるように急激に曲げられている. また, 図 5(b)に上流側円柱後流の図中 $\times$ に示した位置における V 瞬時速度のヒストグラムを示す. このヒストグラムは正と負に二つのピークを持ち, 上流側円柱から巻き上がり放出されるカルマン渦の流下を示している. このカルマン渦が下流側円柱壁面と強く干渉し顕著な空力音が発生すると考える. しかし, $p_x/d_x = 4$ より外れると再循環領域は伸び, 発生する空力音の SPL も小さくなる.

次に, 直交円柱を風上側, 風下側に加えることによってなぜ SPL の値が異なるのかを明らかにするため, 直交円柱を加えた流れ場について示す. 直交円柱ピッチ p_z は, LDV 測定時におけるレーザビームの干渉を考え, $p_z/d_x = 16$ を選定した.

直交円柱を風上側に加えた場合は図 6(a)のような図になり, 再循環領域は $x/d_x = 2.0$ 付近で閉じている. 一方で直交円柱を風下側に加えた場合は図 6(b)のようになり, 再循環領域は $x/d_x = 2.6$ 付近まで伸ばされカルマン渦の巻き上がり位置が下流へ移動している.

比較的 SPL が小さい図 6(b)の場合は, 空力音が顕著な図 5(a)の場合より再循環領域の寸法が伸びており, カルマン渦が大きく巻き上がる位置も下流へ移動している. カルマン渦が十分に巻き上がる前に下流側円柱壁面と干渉するため, 空力音の SPL が小さくなったと考えられる.

Fig.5 Mean velocity vectors and histogram of instantaneous velocity V_{inst} without cross cylinder ($U_0=16\text{m/s}$, $\alpha=10^\circ$).

(a) upwind (SPL=75.3dB(A))

(b) downwind (SPL=72.5dB(A))

Fig. 6 Mean velocity vectors around parallel cylinders with cross cylinder ($p/d_x=16$, $U_0=16\text{m/s}$, $\alpha=12^\circ$).

4. 結言

金網状構造物から発生する空力音の発生するメカニズムを明らかにするために金網状構造物を平行 2 円柱とこれに直交する円柱列とにモデル化し, 平行 2 円柱ピッチ p_x を強い空力音を発する 4 に固定し迎え角や直交円柱の位置, 直交円柱ピッチ p_z を変化させ発生する空力音の特徴および速度場との関連について調べた. その結果, 平行 2 円柱の風上側に直交円柱を配置した場合は特に変化がないのに対して, 風下側に直交円柱を配置した場合は風上側に配置する場合と比べ発生する空力音は小さく, 直交円柱ピッチ p_z が小さくなるにつれ SPL も減少することがわかった. これは上流側円柱から放出されるカルマン渦が風下の直交円柱によってスパン方向に同期して巻き上がることを阻害されると共にカルマン渦の巻き上がる位置がより下流に移動するためと考えられる.

文 献

- (1)宮田 勝文, 林 芳成, 垣内 善永, "一様流中の金網から発生する空力音" 山梨講演会論文集, (2009) pp.142-143
- (2)宮田 勝文, 林 芳成, 石川 裕次郎, "一様流中の傾斜円柱列より発生する空力音" 山梨講演会論文集, (2007) pp.80-81
- (3)宮田 勝文, 林 芳成, "一様流に迎え角をつけて設置した平行 2 円柱から発生する空力音と流れ場" 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集, (2009) pp. 209-210.
- (4)Miyata, M. and Hayashi, Y. "Aerodynamic Sound from Two Parallel Circular Cylinders with Angle of Attack in Uniform Flow" Proceedings of the 17th Australasian Fluid Mechanics Conference, Auckland. New Zealand, (2010) No.97.
- (5)飯田 明由, 藤田 肇, 加藤 千幸, 高野 靖, "空力音の発生機構に関する実験解析(第 1 報 円柱表面圧力変動の空間構造について)" 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 61, No.592(1995) pp. 4371-4378.