

円弧状に曲げた丸棒から発生する空力音に関する研究

Aerodynamic Sound Generated by Bend Round Bars with Large Radius of Curvature

○ 正 松本大樹 (室蘭工大)
吉田哲也 (ゼネラルエンジニアリング (株))

正 齋當建一 (室蘭工大)

Hiroki MATSUMOTO, Muroran Institute of Technology, Mizumoto 27-1, Muroran 050-8585
Ken-ichi SAITOH, Muroran Institute of Technology
Tetsuya YOSHIDA, General Engineering, K.K. Kamata 5-37-1, Ota, Tokyo 144-0052

This paper deals with the aerodynamic noise generated by a round bar bended into a circular arc shape in uniform air flow. The bend round bar has a curvature R and attack angle α . In the experiment, we investigated the effects of R or α on the aerodynamic sound generated by bend round bars. The results of the frequency analyses of the aerodynamic sounds show that the aeolian tones are generated by the bend round bar, when α is large, but that when α is small, although the aeolian tones are reduced, the broad band noise of lower frequencies are increased. In order to decrease aeolian tones, we find the appropriate attack angle α .

Key Words: Aerodynamic noise, Aeolian sound, Noise reduction, Air Flow

1 緒言

円柱から発生する空力音は、エオルス音と呼ばれる単一の周波数の音となる場合がある。この騒音の抑制のためには、トリッピングワイヤを巻く⁽¹⁾などの方法が研究されている。これらの手法は、エオルス音の発生原因であるカルマン渦列の2次元性を破壊することにより、騒音を抑制している。また、円柱が流れに対して直交せず、傾いている場合に発生するエオルス音の周波数はコサイン法則に則って周波数が下がり、さらに大きな角度となった場合にはエオルス音は発生しないことが知られている⁽²⁾。したがって、エオルス音の抑制のためには、流れに対して円柱の軸との角度を大きくするなどして、カルマン渦列の2次元性を破壊することが必要となる。

本研究では、丸棒を湾曲させることによって、カルマン渦列の発生を抑制し、エオルス音を抑制することを試みている。これまで曲率半径の小さなリング状に加工した丸棒や半円弧状の丸棒について発生する空力音の特徴と音源について検討を行った⁽³⁾、⁽⁴⁾。この報告では、さらに大きな曲率半径で曲げた丸棒を用い、流れに対する姿勢と発生する空力音の周波数特性との関連について検討した結果を報告する。

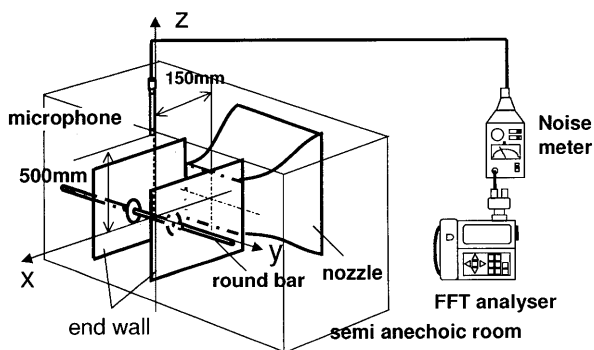


Fig. 1: Experimental setup.

2 実験装置および供試体

2.1 実験装置 図1に実験装置の概要図を示す。風洞の吹き出し口は1辺が100mmの正方形であり、吹き出し口両側には音響透過性端板を取り付けてある。供試体である曲円柱は壁面の流れの影響を遮るための厚さ0.5mm、直径35mmの円板が、流れと平行に取り付けられている。実験において曲円柱は、支持部が吹き出し口から150mmの位置になるように設置され、その真上500mmの位置にマイクロホンが設置され、発生した空力音を計測する。計測した空力音はFFTアナライザで周波数分析される。

壁面の影響を受けないために、供試体の両側には厚さ0.5mm、直径35mmの円板が取り付けられており、支持部（音響透過性端板を貫通する円柱部分）と円板が発生する空力音を暗騒音（BGN）と定義する。

図2に直円柱を挿入した場合に発生するエオルス音の周波数特性を示す。

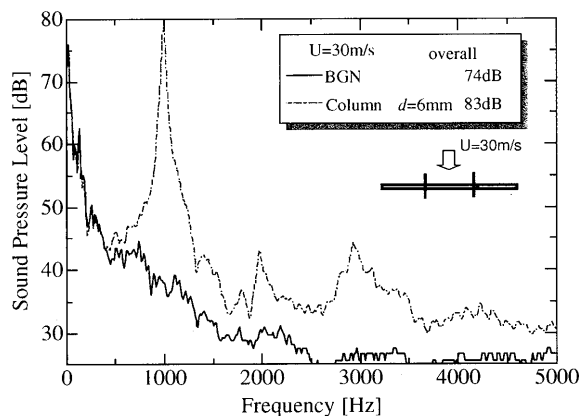


Fig. 2: Frequency characteristics of aeolian sound generated by a circular cylinder.

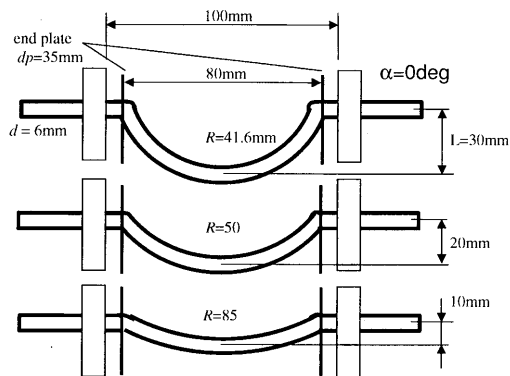


Fig. 3: Bend round bar.

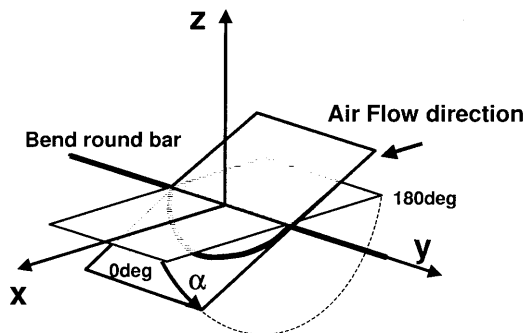


Fig. 4: Attack angle for the bend round bar.

破線は直円柱の空力音、実線は暗騒音である。直径 6mm の円柱から発生するエオルス音は、975Hz にピークを持つ。その際のストロハル数は 0.195 となる。また、暗騒音は 74dB と高めであるが、エオルス音の発生するピーク周波数では 10dB 以上の差があり十分判別できると考えられる。

2.2 供試体 円弧状に曲げた丸棒の概要図を図 3 に示す。供試体の直径は 6mm、曲率半径を R とし、端板間の距離を 80mm として音響透過性端板の間に設置される。設置角度は図 4 に示すとおり、円弧状丸棒と気流とのなす角 α を基準とする。水平面内に円弧が含まれ、下流側に円弧の頂点がくる場合を $\alpha = 0\text{deg}$ とし、そこから y 軸の正方向からみて反時計回りに α をとる。

$\alpha = 0\text{deg}$ の場合に、供試体の頂点位置と支持部との距離 L が 30, 20 および 10mm となるように形状を決定する。実験においては、この 3 種類の供試体をそれぞれ流速 30m/s の気流中に挿入して、発生する空力音を計測した。なお、円弧状丸棒の曲率半径はそれぞれ、41.6, 50, 85mm となる。また、流れとの迎え角 α を可変させ、その際に発生する空力音の変化を検討する。

2.3 噴流 図 5 にノズル出口流速が 30m/s の場合に、出口端から 200mm 下流での速度分布を熱線流速計で計測した結果を示す。流速は、中心軸より $\pm 30\text{mm}$ の範囲でほぼ一様な分布であることがわかる。

迎え角 α を変化させた場合、円弧状の丸棒が流れに占める投影面積が変化する。このため、噴流端の速度の不均一の影響が、円弧状丸棒の曲率半径によって異なることが考えられる。そこで、最大の投影面積となる $\alpha = 90\text{deg}$ の場合の結果を比較し、その影響を確認する。迎え角が 90deg の場合の L の異なる各丸棒から発生する周波数特性を図 6 に示す。この場合には丸棒の各断面はどの位置においても流れに対して垂直になって

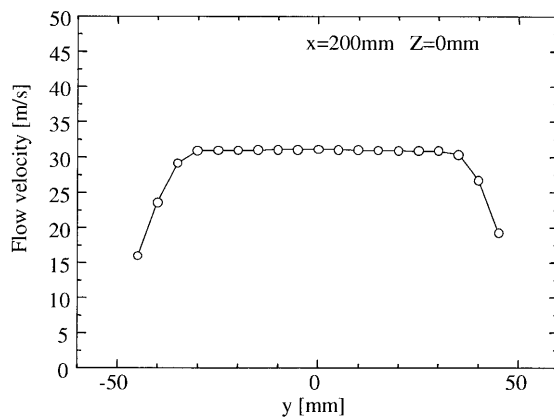


Fig. 5: Distribution of flow velocity.

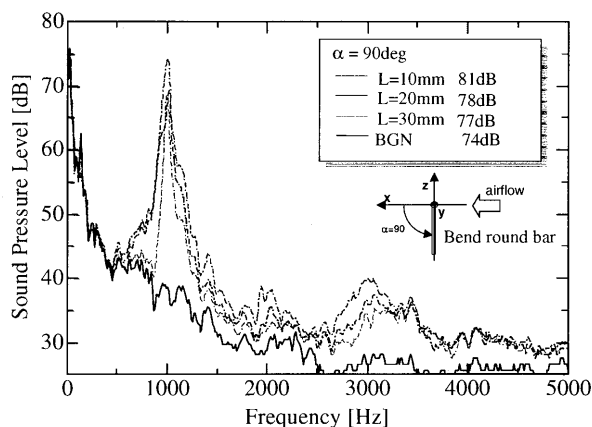


Fig. 6: Frequency characteristics of the aerodynamic noise generated by a bend round bar.

いるため、曲率半径が発生音に及ぼす影響が小さく、かつ直円柱の場合と同じようにエオルス音が発生すると考えられる。図を見ると明らかなように、いずれの円弧状丸棒もピーク周波数が 975Hz のエオルス音が発生していることがわかる。噴流中に入っている丸棒の長さが異なることから、発生する騒音のレベルは異なるが、その特性はほぼ同じと見ることができる。噴流に占める面積が最大である $\alpha = 90\text{deg}$ の場合の結果が同じであるから、噴流の Z 方向の流速の不均一の影響はほとんどないことがわかる。

3 実験結果

3.1 円弧状の丸棒から発生する空力音の特徴 図 7 に円弧の曲率半径を変化させ、頂点位置 L を変えた場合に発生する空力音の周波数特性を示す。いずれの円弧状丸棒においても、500 から 1100Hz の周波数帯域のレベルが暗騒音レベルよりも大きくなっていることがわかり、中心周波数は同じ直径 6mm の直円柱 (図 2) のピーク周波数よりも、小さくなっていることがわかる。

これは、円柱軸が円弧状に曲がっており、円柱の軸を乗り越える (円柱軸と直角な成分) 流れと円柱軸との角度が大きくなったため、コサイン法則により渦の流出周波数が低くなったと考えられる。このため、発生する空力音も低周波数帯の騒音が中心となって発生していると考えられる。

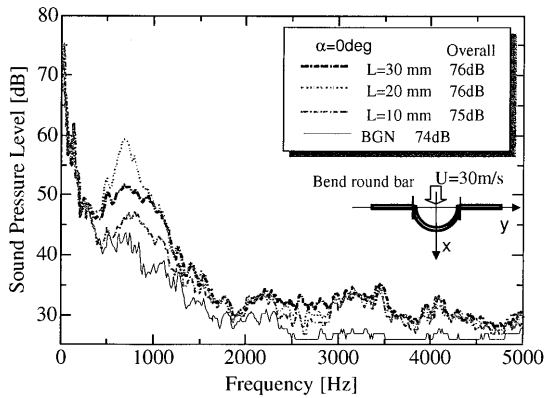


Fig. 7: Frequency characteristics of the aerodynamic noise generated by a bend round bar.

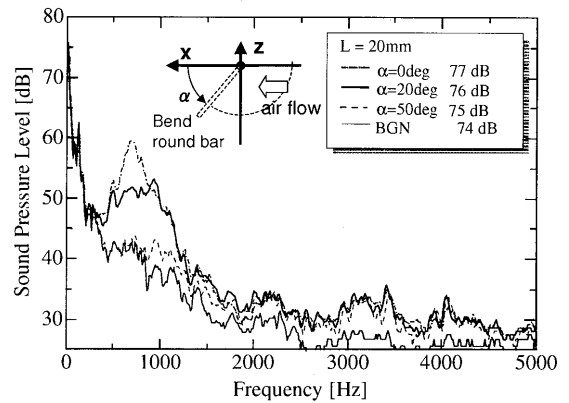


Fig. 9: Effects of attack angle on the frequency characteristics of the aerodynamic sound ($L=20\text{mm}$, $\alpha=0,20,50\text{deg}$).

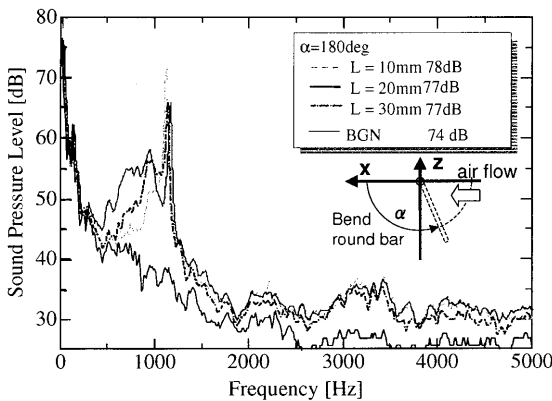


Fig. 8: Frequency characteristics of the aerodynamic sound ($L=10, 20, 30\text{mm}$, $\alpha=180\text{deg}$).

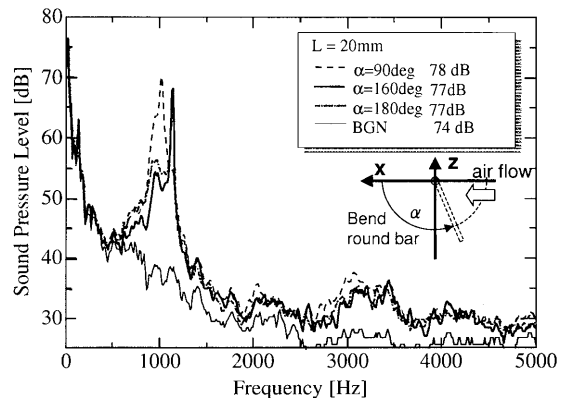


Fig. 10: Effects of attack angle on the frequency characteristics of the aerodynamic sound ($L=20\text{mm}$, $\alpha=90,160,180\text{deg}$).

図7において、最大の音圧レベルを示すのは $L=20\text{mm}$ の場合であることがわかるが、 L の変化に対する音圧レベルの変化に明確な規則性は見られない。このメカニズムは明確ではなく、 $\alpha = 0\text{deg}$ で、円弧の頂点が下流側にある場合に発生する空力音の発生メカニズムの詳細な検討が必要である。

一方、 α を 180deg とし、円弧状丸棒の設置の仕方を図7の場合と反対向きにした場合の周波数特性を図8に示す。いずれの円弧状丸棒についても、卓越したピークが見られ、オーバーオール音圧レベルも大きくなっている。 L が大きいほど 1000Hz より低い周波数帯の音圧レベルは大きくなり、逆に L が小さい場合には約 1200Hz 近傍の周波数成分が大きくなる。 L が大きい場合には、曲率半径は小さく、流路中の丸棒の軸と流れ方向とがなす最大の角度は平行に近いぐらい大きくなる。このため、後流の乱れが大きくなり、空力音は低周波数成分が大きくなると考えられる。曲率半径が大きい場合には、直円柱の場合の周波数特性と似ており、単一のピークを持つ周波数特性と見ることができる。

同じ L でも $\alpha=0\text{deg}$ と 180deg とで発生する空力音の周波数特性はかなり異なり、上流側に円弧の頂点がある場合にはエオルス音が発生している。下流側に円弧の頂点がある場合にはエオルス音は消える。これは、 $\alpha=0\text{deg}$ の場合には、丸棒の後流

へ丸棒の軸に添って気流が流れ込むために、規則的な渦の流出が抑制されるためである。このように、同じ円弧状丸棒においても迎え角によっては大きく発生音が異なることが明らかとなり、迎え角に依存して変化することがわかった。

次に、図7において最大の音圧レベルを示した $L=20\text{mm}$ の円弧状丸棒から発生する空力音について、迎え角 α を変化させた場合の検討を行う。

3.2 迎え角変化の影響 さらに詳細に迎え角を変化させた場合を図9, 10に示す。図9を見ると、 0deg から次第に大きな迎え角を取るにつれて、 750Hz を中心に発生していた空力音の音圧レベルが小さくなって行くことがわかる。 $\alpha=50\text{deg}$ において、発生する空力音のレベルは最小となり、オーバーオール音圧レベルで 75dB とほぼ暗騒音レベルとなる。 α が 90deg となると円弧状丸棒のすべての断面は気流に直角となり、カルマン渦列が発生すると考えられるが、実際にエオルス音の発生する α は 90deg ではなく、それよりも小さい角度で発生した。

そのエオルス音が発生する迎え角 α の境界を見積もるために、図11を示す。 $\alpha = 60\text{deg}$ の場合には、エオルス音は発生

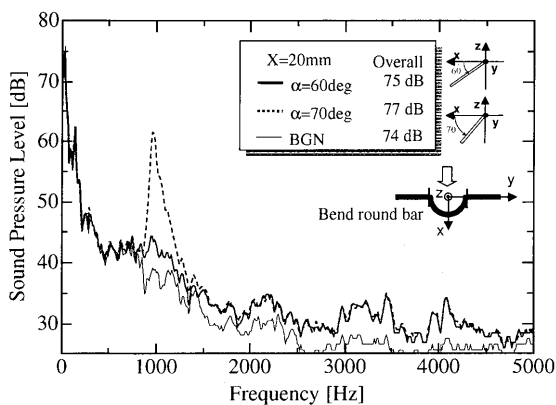


Fig. 11: Frequency characteristics of the aerodynamic sound(L=20mm, $\alpha=60,70\text{deg}$).

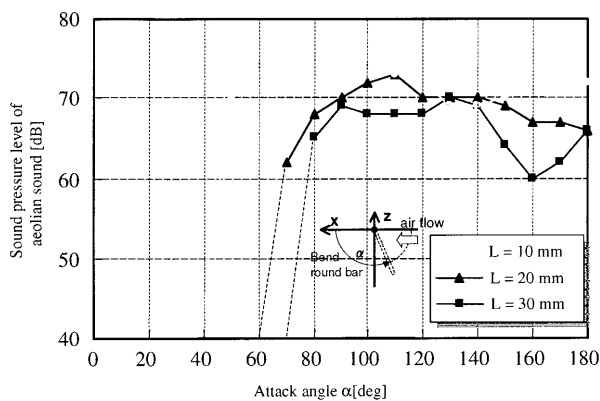


Fig. 12: Sound pressure levels of Aeolian sounds.

していないが、 $\alpha=70\text{deg}$ では、約 1000Hz にピークを有する空力音が発生していることがわかる。このときのストロハル数は 0.195 であり、直円柱とほぼ同じであるが、ピークの音圧レベルは直円柱の場合に比べて小さい。

これは、両端に端板のついた円柱から流出するカルマン渦列は、円柱の軸方向に長い 2 次元性を保って流出されるが、円弧状丸棒の各断面は流れに対して角度を持つため、後流での 2 次元性は直円柱の場合よりも弱くなると考えられる。このため、後流での圧力変動が小さくなり、空力音のレベルが小さくなったと考えられる。

迎え角 α が次第に大きくなると、70deg 付近で円柱断面から規則的な渦流出が開始され、直円柱と同じ周波数のエオルス音が発生するが、さらに α が大きくなると、ピーク周波数は次第に高くなり、180deg では約 1150Hz となる。この際のピークは単一ではなく、およそ 1000Hz 近辺の周波数にも小さなピークを有するのが特徴である。

図 12 にエオルス音が発生する場合のピーク音圧レベルと迎え角との関係を示す。点線は明確なエオルス音の発生が認められなかった状態を示している。L が小さいほど小さな迎え角からエオルス音が発生していることがわかる。すなわち、L=10mm では、 $\alpha=40\text{deg}$ からエオルス音が発生することに対して、L=30mm では $\alpha=80\text{deg}$ で発生していることがわかる。

Tab. 1: The attack angle for smallest overall sound pressure value of aerodynamic sounds.

Length L	Attack angle α	Overall SPL
10mm	20deg	75dB
20mm	50deg	75dB
30mm	70deg	75dB

最後に、最小のオーバーオール値を示す迎え角 α を表 1 に示す。オーバーオール音圧レベルが最小となった場合の周波数特性は、ほぼ暗騒音の周波数特性と等しくなる。L が大きくなるにつれてより大きな迎え角にする必要があることがわかる。

4 結言

以上より、円弧状丸棒から発生する空力音の特徴は以下のようにとまとめることができる。

1. 一様気流中の円弧状丸棒から発生する空力音は、気流中の姿勢によって大きく異なり、エオルス音が発生する場合と、広帯域の雑音が発生する場合がある。
2. 発生する空力音への迎え角 α の影響が大きく、 $0 \leq \alpha < 90\text{deg}$ の範囲内では、エオルス音が発生しない状態があり、暗騒音とほぼ同じレベルとなる迎え角が存在する。
3. 3 種類の円弧状丸棒について、エオルス音が抑制され、オーバーオール音圧レベルが最小となる迎え角の条件を明らかにした。

参考文献

(1) 真鍋克士, 白国紀之, 森川武雄, 高速列車のパンタグラフ空力音対策, 機論, 51-463, B(1985), 959-964
 (2) 山田彰二, 藤田肇, 丸田芳幸, 横浩幸, 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), 機論, 63-610, B(1997), 1974-1979
 (3) 松本大樹, 西田公至, 齊当建一, “一様気流中に水平支持された円弧状ワイヤーから発生する空力音”, 機構論, No.00-14, (2000.9), p238
 (4) 松本大樹, 西田公至, 齊当建一, “円弧状ワイヤーから発生する空力音の音源分布”, 機構論, No.002-1, (2000.9), pp110-111