1209 ボイラ管群における空力自励音の対策法に関する研究 (ゴム板部設置位置の自励音抑制に与える影響)

Study on Countermeasure of Self-Sustained Tones in Boiler Tube Bank

(Effect of rubber board installation position on suppression of self-sustained tone)

○学 高橋 武史 (徳島大院)

正 石原 国彦 (徳島大院)

Takeshi TAKAHASHI, The University of Tokushima, Faculty of Eng., Kunihiro ISHIHARA, The University of Tokushima, Faculty of Eng.
2-1 Minami-Josanjima-Cho, Tokushima, Tokushima-Pref. 2-1 Minami-Josanjima-Cho, Tokushima, Tokushima-Pref.

Key Words: Self-Sustained Tone, Rubber Board, Acoustic Damping

1. 緒言

ボイラ、ガス加熱器などの熱交換器には、ガスタービンの排ガスやボイラ炉からのガスが通るダクトの内部に管群が設置されている。この管群部をガスが通る際にカルマン渦が発生し、この渦とダクト内の音場の干渉により空力自励音と呼ばれる大音量の騒音が発生することがある。

以前に空力自励音の対策として、ダクトの両側面全体に伸縮可能なゴム板を取り付け送風実験を行った。これはダクトへの送風時に自励音が発生したとき、ゴム板が振動することによって流れ直角方向の共鳴モードを抑えられるのではないかと考えたからである。これにより限定的ながら自励音の抑制に成功した。そこで本研究では新たに「ゴム板部」と呼ぶパーツを作成し、ダクト両壁の全体ではなく場所を選んでダクト両壁に取り付けられるようにした。自励音の対策法としてのゴム板部の最適な挿入位置を実験により検証する。

2. 空力自励音

管群に流体が当たることにより、下流部にカルマン渦が発生する。流速の上昇によりカルマン渦の脱落周波数（以下では単に、渦の周波数と記す）も比例して上昇する。しかしダクトの共鳴周波数に近い範囲では、図1の様にカルマン渦の周波数がダクトの共鳴周波数に遷移することがある。この現象はロックイン現象と呼ばれ、このときに自励音が発生することが知られている。

Fig.1 Lock in phenomenon

3. 実験装置

図2.a, bに実験装置の全体図と、それを上部から見た図をそれぞれ示す。図中の数字の単位はすべて[mm]である。

Fig.2.a Experimental apparatus

Fig.2.b Experimental apparatus

ダクトは全長 1120mm、内側断面 200mm×250mm であり、アクリル製である。管群は図のように設置され、管は真鍮製で管直径は 6mm、 $T/d=L/d=2$ の正配列であり、ダクト幅方向に 19 本、流れ方向は 5 列である。ここで、図 2.a 左の送風機は、インバータ周波数を変化させることによって風量が調節可能であり、自励音が発生しない限りインバータ周波数と流速は比例関係にある。また、ゴム板は厚さ 1mm、高さ 194mm のものを用いており、これをアルミ製の支持板に巻きつけてゴム板部としている。このゴム板の振動部分の長さは 180mm であり、図 2.b の様にダクトの両壁に設置する。このとき、ゴム板部の設置位置は前後に調節可能である。

4. 実験方法

送風機によりダクト内に風を送り、インバータ周波数によって流速を調節し、各流速での騒音レベル、騒音スペクトルを計測した。ここで、騒音レベルと音圧は図 1.a で示したようにダクト出口上部に設置した騒音計で計測し、流速はダクト出口の 25 点において計測して、それらの平均値として求めた。また、騒音スペクトルの計測には FFT アナライザーを用いた。さらに、送風を行っていない状態でダクトの管群後方部 280mm の点にスピーカーを設置してサインスイープ波を出力し、その音圧の共鳴曲線から半値幅法によってダクト内音場の音響減衰比を求めた。これらの実験を、ゴム板部未設置の状態と、ゴム板部の設置位置を 4 通りに変えた状態の合計 5 通りにおいて行った。ゴム板の設置位置については、図 2.b で示した L を、L=0, 60, 120, 180mm としパターン分けをした。

5. 実験結果と考察

5.1 隙間流速と騒音レベル

図3に、上記の5通りのダクトにおいての各隙間流速に対する騒音レベルを示す。ここで隙間流速とは、管群部の管と管との間の流速であり、ダクト出口部で計測した流速の平均値に管群部での断面積比を乗じて算出したもので、以下 U_g で表す。

Fig.3 Relation between rubber board installation position and SPL

ゴム板部を取り付けていない場合については $U_g=14\text{m/s}$ 付近を境に急激に騒音レベルの上昇がみられ、空力自励音が発生した。また、ゴム板部を設置した場合でも $U_g=18\text{m/s}$ 付近から騒音レベルが上昇しており、 $L=120\text{mm}$ を除いて自励音が観測された。しかしゴム板部を取り付けていない場合と比較して、ゴム板部を設置した場合の自励音の騒音レベルは小さかった。これはゴム板部を設置したことにより、ダクト内での自励音の発達が抑制された結果であると思われる。そし

て流速をさらに上げていくと、騒音レベルは次第に低下し最終的には自励音は観測されなくなるまでにいった。これは自励音の成長が阻害され流速が上昇しやすくなったため、第3章で述べたロックインの範囲から脱出した結果と言える。中でも $L=120\text{mm}$ の場合に関しては、 $U_g=18\text{m/s}$ 付近で騒音レベルの上昇が見られるものの、それが空力自励音と呼べるまで発達する前にロックイン現象を脱出した。ロックイン時でも騒音レベルが 100[dB] 未満であり、ロックイン脱出後の風切り音の騒音レベルも超えておらず、ゴム板部を設置した4つの状態の中で最もその効果が表れている。

それに対して $L=0, 60, 180\text{mm}$ での自励音抑制効果が小さいのは、自励音の主要な発生源である管群後方にゴム板が存在しない ($L=0\text{mm}$)、存在していてもその長さが短い ($L=60\text{mm}$)、管群部にゴム板が存在しない ($L=180\text{mm}$) などの要因で自励音の共鳴の抑制が不十分だったためであると思われる。

5. 2 騒音スペクトル

図4にゴム板部を設置していない状態での、図5, 6, 7にゴム板部を設置している $L=60, 120, 180\text{mm}$ での騒音スペクトルを、隙間流速をパラメータとしてそれぞれ示す。

図4より、ゴム板部を設置していない状態では流速の上昇に従い、実験に用いたダクトの幅方向1次の理論共鳴周波数である 680Hz 付近で自励音のピークが見られ、これが空力自励音の周波数である。また流速の上昇に従い、自励音のピーク周波数も高周波側へ移行している。

また図5, 6, 7より、ゴム板部設置時の $L=60, 120, 180\text{mm}$ でも 680Hz 付近でピークが見られる。しかしゴム板部を設置していない状態と比べると、その音圧は総じて小さく、流速の上昇に従いそのピーク周波数も高周波側へ移行し、音圧も減少していることがわかる。 $L=120\text{mm}$ の場合については、他よりも一桁小さく 1[Pa] を超えることはなかった。

また、流速の上昇に従って自励音のピーク周波数も高周波側へ移行しているのは、自励音発生時にロックイン現象が起こりつつも、流速の上昇によってカルマン渦の周波数も少しずつ上昇しているためであると推測される。図5の $L=60\text{mm}$ の $U_g=31.8\text{m/s}$ において、自励音が騒音として観測されていないにもかかわらず 715[Hz] 付近でピークが観測されている点も、上記の理由によりカルマン渦の周波数とダクト内の音場の干渉によるロックイン現象が観測されたものと思われる。なぜなら、 $St=0.26$ とすると渦の周波数は 1378Hz と高いためである。

Fig.4 Noise spectrum (without rubber)

Fig.5 Noise spectrum ($L = 60\text{mm}$)

Fig.6 Noise spectrum ($L = 120\text{mm}$)

Fig.7 Noise spectrum ($L = 180\text{mm}$)

5. 3 音響減衰比

表1は、スピーカテストで得られたスペクトル波形から算出したダクト内音響減衰比と、送風時に観測された最大騒音レベル(O.A.値)、自励音の1次ピークの最大の音圧値との関係を表したものである。ゴム板部の設置位置が下流側になるほど高い音響減衰比が得られている。

Table.1 Relation between damping ratio and noise level

	ζ	SPL[dB(A)]	$P_{\text{max}}\text{[Pa]}$
Without rubber	0.007606	125.2	28.121
$L = 0\text{mm}$	0.010383	119.2	13.214
$L = 60\text{mm}$	0.010269	120.0	7.693
$L = 120\text{mm}$	0.011345	103.8	0.925
$L = 180\text{mm}$	0.011573	108.6	2.924

過去に行われた、管群後方に吸音材を張り付け、その張り付け長さにより音響減衰比に変化を与えた場合での実験においては、管群列数が同じならば音響減衰比が高いほど自励音の抑制効果も高くなるという結果が得られている。また、前回行ったダクトの両側面全体にゴム板を取り付け、そのゴム板の張力の大小により音響減衰比に変化を与えた場合での実験においても同様の結果となっている。

しかし今回の実験においては、最も音響減衰比の高い $L=180\text{mm}$ の場合よりも $L=120\text{mm}$ の方が、騒音レベルと自励音の1次ピークの音圧値ともに大きな減音効果が得られており、これまでの傾向と相反する結果となっている。今回の、ゴム板部の設置位置が下流側であるほど高い音響減衰比が得られている点については、音響減衰比を算出するために行った掃引テストでのスピーカの設置位置に、ゴム板部が次第に近づいて行ったため、下流側ほど高い音響減衰比が得られたのではないかとと思われる。

6. 結言

本研究において得られた結果は以下の通りである。

- 1) ダクト内部両壁にゴム板部を設置することは、空力自励音の抑制にある程度の効果が得られる。
- 2) 高い抑制効果を得るには、ゴム板部が管群部とその下流部に十分な長さで存在することが必要である。
- 3) 音響減衰比と自励音の抑制効果の関係には不明な点もあり、今後検討していく予定である。