

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月28日現在

機関番号：36102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560226

研究課題名（和文） ボイラ・熱交換器で発生する大音響騒音の対策法に関する研究

研究課題名（英文） Study on Countermeasures for High Level Sound Generated in Boiler and Heat Exchanger

研究代表者 石原 国彦（ISHIHARA KUNIHICO）

徳島文理大学・保健福祉学部臨床工学科・教授

研究者番号：30380108

研究成果の概要（和文）：ガスヒータやボイラなどの熱交換器の管群にガスが流れるとカルマン渦が発生し、空力自励音と呼ばれる大音響の騒音が発生する。これは渦と音場の干渉によって生ずるもので従来はバッフル板の挿入により対策していた。しかしながら挿入方法により効果が得られないなどまだ挿入方法が確立したとは言い難い。そこで本研究ではダクト壁を柔軟にすることで共鳴モードが立たないようにして騒音を抑制しようと試み実験を行った。その結果、ある条件で抑制効果が得られることが判明し、柔軟壁の有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：Karman vortex occurs when the gas passes through the duct with tube bank of the heat exchangers, such as a gas heater and a boiler, and the very high level noise called “Self-Sustained Tones” occurs due to the interference of the vortex and the sound field in the duct. In general, baffle plates are used to suppress the self-sustained tone. However, it is difficult to use them effectively, because insert condition is vague. Then, rubber boards as flexible walls are installed in both sides of the duct to suppress the Self-Sustained Tones. Because we thought that the resonance mode of the duct perpendicular direction to the flow may be suppressed by rubber boards vibrating, when Self-Sustained Tones occurred. The experiment was carried out to examine the suppression effect of the rubber boards installed. As a result, the suppression effect appeared at a certain condition. The purpose of this study is to clarify “Effectiveness of the rubber sheet for Self-Sustained Tones”

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：ボイラ、熱交換器、気柱共鳴、空力自励音、ストロハル数、音響減衰、カルマン渦、ダクト音場

1. 研究開始当初の背景

(1) ボイラ・熱交換器などの管群や配管内に設置された物体（整流板など）などは、発電プラントや化学プラントなどのあらゆるところで使用されており、重要な機能を有する設備要素である。しかしながらプラントを

稼働させると予想しなかった大音響の純音（以下異音）が発生し、作業員はもとより近隣住民からの苦情が殺到するなど大問題となり、プラントを停止せざるを得ない場合もしばしば見受けられる。その結果、多大な補償工事費が発生するのみならず、社会的な信

用を失墜するなど計り知れない損害を被る。したがってこのような事態を未然に防ぐ技術の確立は重要であり、ニーズも高い。

(2) この種の問題は音響共鳴と呼ばれ、管群背後に生ずるカルマン渦の脱落周波数とダクトが有する気柱共鳴周波数とが一致すると発生すると考えられている。しかしながら実際の現象では、流速を増しても異音が発生し続けるため、自励現象であるとの見方もある。一般に自励現象は励振力（または励振エネルギー）と減衰力（消散エネルギー）との大小関係で発生の有無が決定される。なぜなら自励現象の最大の特徴が固有振動数、音響では共鳴周波数で振動することから慣性力と復元力とは常に釣り合っているためである。

2. 研究の目的

(1) 本研究では空力自励音（以下自励音）を抑制する手段として従来のバッフル板挿入とは異なる新しい方法を提案し、その効果を確認することである。本研究では新しい方法としてダクトの壁を柔軟壁（ゴム板）とすることで共鳴モードを起りにくくし、もって自励音発生を起りにくくした。その結果、ゴム板の張力、ひいてはゴム板の固有振動数と音響減衰比との関係、管群列数と音響減衰比の組み合わせによる自励音発生の有無などが明らかになった。

3. 研究の方法

(1) 実験装置 図3に実験装置を、図4に実験装置の管群部を上から見たときの図を示す。ただし、図3についてはゴム板は未装着であり、図4はゴム板装着時のものである。ダクト寸法は図1に示した通りで、管群は流れ方向に最大9列×流れ直角方向19本を一つの管群部としており、その長さは120mmである。管は直径 D が6mmの真鍮丸棒を12mm間隔に並べた正方配列($T/D=2.0$, $L/D=2.0$)である。ここで T , D はそれぞれ流れ直角方向管ピッチ, 流れ方向管ピッチである。ゴム板は、壁から7mmの空気層を設けてダクト内部の左右両壁の全面に装着され、管群部付近でのゴム板の振動を独立させるため、管群部の前後30mmの箇所に支持板を設置した。ゴム板は、ダクト後方部の六角棒で巻き取ることにより、張力の調節が可能となっている。

(2) 実験によるパターン分け 自励音に対するゴム板装着の効果を、ゴム板未装着時の実験結果と比較して検証するため、前述の実験装置についてゴム板の有無によりパターン分けをする。ゴム板未装着時をパターン0とし、ゴム板装着時についてはゴム板の固有振動数の値を調節しパターン1~4の5パターンに分けた。パターン1の張力を最小とし、パターン4まで順にゴム板にかかる張力

が大きくなるものとしている。

(3) 流速の計測 ダクト出口部の断面を縦横ともに6分割したときの格子点、計25ヶ所で流速を計測し平均の出口流速を求める。ここで送風機の条件として、インバータ周波数 f_{inv} は20~60[Hz]の間で5[Hz]刻みで、ただし空力自励音発生の際目がある箇所については1[Hz]刻みで増加させながら変化させた（例えば $f_{inv}=30$ [Hz]では自励音が発生せず、 $f_{inv}=35$ [Hz]で自励音が確認された場合には $f_{inv}=31, 32, 33, 34$ [Hz]での流速も計測する）。なお、このインバータ周波数 f_{inv} の変化のさせ方はこの後の他の実験、計測でも同様とする。また、インバータ周波数と流速は、自励音未発生時においては比例関係となる⁵⁾。

その後、出口流速から隙間流速を1.95倍（断面積比）して求める。以降は、流速を扱う場合にはこの隙間流速 U_g [m/s]を用いる。

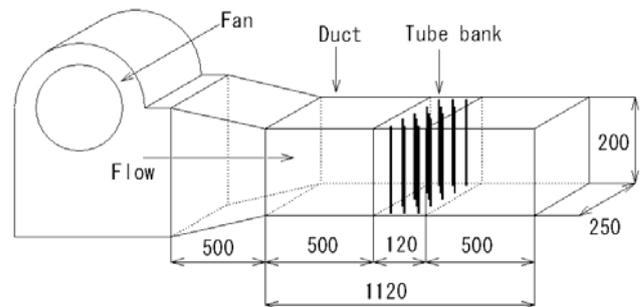


図1 実験装置全体

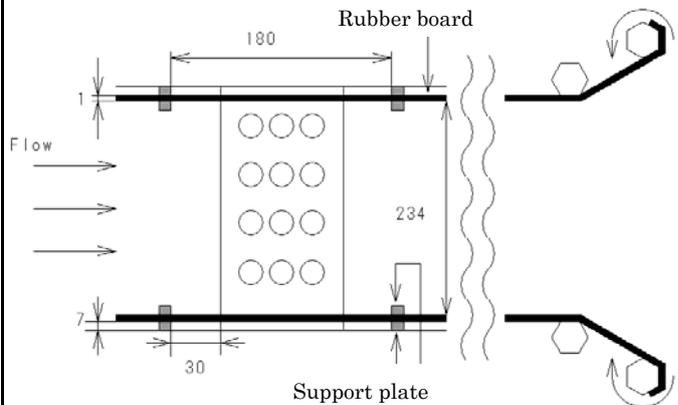


図2 実験装置のゴム板部

4. 研究成果

(1) 騒音レベル 送風実験の際の騒音レベルを、2・3節で得た隙間流速を用いて管群列数 $N=3, 9$ の場合を代表例として図5, 図6にそれぞれ示す。なお、ゴム板の張力の変化によるパターン分けをパラメータとしている。グラフの実線は自励音発生時、点線は自励音非発生時のものである。管群が3列の場合には、ゴム板を装着していない場合のみ $U_g = 24.2$ [m/s]以上で自励音が

発生し急激な騒音レベルの上昇が見られた。一方、ゴム板装着時では空力自励音は観測されず、流速の上昇に対して騒音レベルに急激な変化は見られなかった。ゴム板装着時のものでも騒音レベルは少しずつ上昇しているが、これは送風による流体騒音であるため、自励音とは無関係である。その根拠は自励音非発生時の騒音の流速依存性は双極子音源(荷重音源)の特徴である6乗則に従うためである。図中の破線は6乗則を示している。また、パターン1~4に特に際立った差はなく、その張力による違いは見られなかった。この結果よりゴム板の装着によって自励音が抑制されたことが分かる。

それに対して、管群が9列の場合には各パターンで違った傾向を示している。パターン0では、 $U_g=13.5[m/s]$ 以上で急激な騒音レベルの上昇が見られた。また、パターン3でも $U_g=16.4[m/s]$ 以上、ここでは示していないがパターン4でもほぼ同様の流速から自励音が観測された。それ以外のパターン1, 2では自励音は観測されず、張力が小さいほど自励音が抑制されるという結果となった。

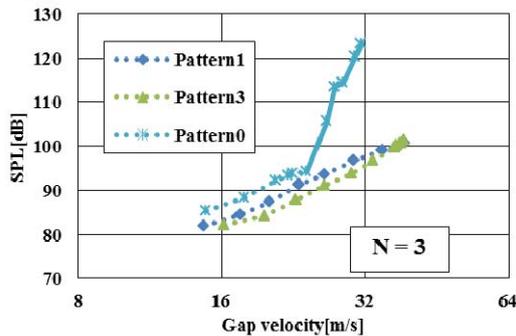


図3 Vg と fv の間の関係

(2) 騒音スペクトル 実験に用いたダクトの幅方向1次モード(以下1次)の理論共鳴周波数 f_1 は、音速 $c[m/s]$ 、ダクト幅 $L[m]$ を用いて、

$$f_1 = \frac{c}{2L}$$

と表わされる。 $c=340[m/s]$ 、 $L=0.250[m]$ なので、

$$f_1 = \frac{340}{2 \times 0.250} = 680 [Hz]$$

上記の N=9 列での騒音レベルを、騒音スペクトルで表わしたものを、1次の理論共鳴周波数 f_1 を含む 600~800[Hz]の範囲で、パターンごとにそれぞれ図7, 8, 9に示す。なお、隙間流速をパラメータとして用いる。また、表2に各状態での送風時の自励音の1次ピークでの最大音圧レベルを示す。

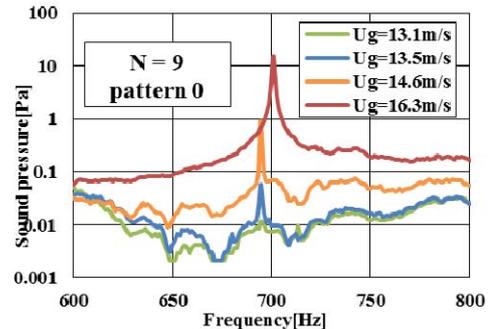


図3 Vg と fv の間の関係

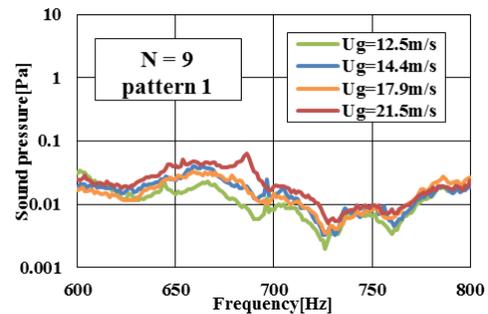


図3 Vg と fv の間の関係

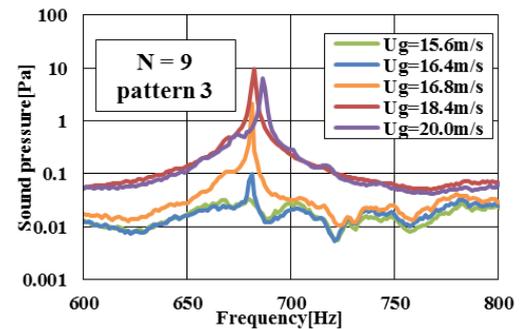


図3 Vg と fv の間の関係

パターン0, 3のスペクトル波形の1次の理論共鳴周波数 f_1 付近において、流速の上昇とともに徐々に大きくなるピークが見られ、自励音の発生が確認された。そして、時励音のピークの周波数も徐々に高周波数側に遷移している。これは1・2章で述べたロックイン現象のためである。一方、パターン1の場合、パターン0での自励音発生流速を超えてもスペクトルのグラフにピークは見られず、騒音レベルの急激な変化も確認できなかった。その後、流速を上げてでも空力自励音は発生しなかった。このことから、ゴム板をダクト内側壁に装着することは自励音の抑制に有効であることがわかった。同様にパターン2の場合も自励音を抑制することに成功した。

…(4)

Table.2 Maximum SPL

SPL[dB]	N=1	N=3	N=5	N=7	N=9
Pattern 1	-	-	-	-	-
Pattern 2	-	-	-	-	-
Pattern 3	-	-	-	93	106
Pattern 4	-	-	113	110	101
Pattern 0	-	106	111	110	110

パターン 0(ゴム板無し)とパターン 3(ゴム板有り)を比較してみると、パターン 3 ではパターン 0 ほど大きなピークは観測されておらず、音圧値が大きく低下している。完全に自励音を抑制することはできなかったものの、これも大きな抑制効果であると言える。

また、上記以外の実験結果から、管群列数が少なくゴム板の張力が小さいほど自励音は発生しにくいということが改めて確認された。

(3) ダクト内音響減衰比 自励音の代用としてダクト内の管群後方 250[mm]の箇所にスピーカーを挿入し、500~1000[Hz]における純音を与える。このとき、送風は行わない。そして管群のすぐ後ろに挿入したマイクでその際の騒音を計測し FFT アナライザで騒音スペクトルに変換する。この波形からダクトの共鳴周波数 f_m を読み取り半値幅法を用いて音響減衰比を求める。共鳴周波数は、計測した騒音スペクトルのピーク時の周波数から求める。この実験は管群列数 $N = 1, 3, 5, 7, 9$ 列のパターン 0~4 すべてについてそれぞれ行う。図 10 に各列数、各パターンでの実験で得られた音響減衰比 ζ を示す。ゴム板の張力によるパターン分けをパラメータとしており、縦軸は音響減衰比 ζ 、横軸はダクト流れ方向の管群列数である。

図 10 より、どの列数でもゴム板の張力が上昇するに従って(パターンの番号が増加するに従って)、音響減衰比は低下しており、ゴム板無しの状態(パターン 0)に近付いていることがわかる。端的に言えば、ゴム板に作用する張力が弱いほど音は抑制されやすいということになる。これは 2・4 節で述べた結果からも確認される。

図 10 を横に見ていくと、各パターンの音響減衰比はどの列数でも同程度の値となっている。また、どの管群列数でも音響減衰比は、パターン 0 < パターン 4 < パターン 3 < パターン 2 < パターン 1、が成立している。

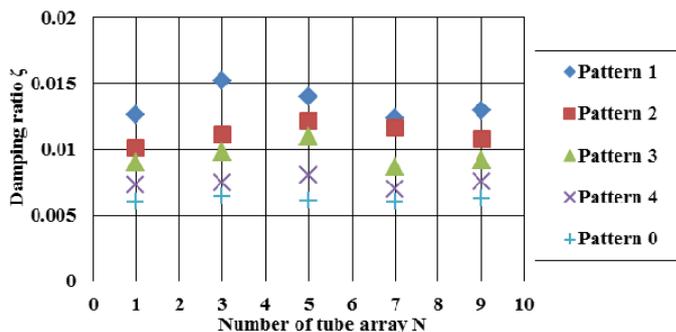


図 3 V_g と f_v の間の関係

(4) 音響減衰比と自励音予測 前述の方法で得られた、管群列数 N と音響減衰比 ζ 、自励音の騒音レベルの関係を図 11 に示す。ゴム板の張力によるパターン分けをパラメータとしており、縦軸、横軸は図 10 と同様である。そして任意の管列数、パターンの下で観測された自励音の 1 次のピークの音圧レベルの値([dB])から 80 [dB] を引いた値を、図中の円の直径として表している。つまり、図中の円のうち大きいものは自励音が観測された条件である。小さいものは自励音の発生していない状態であり、ここでは 1[dB] として与えている。

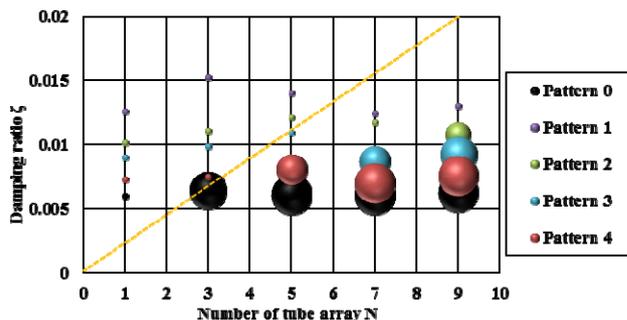


図 3 V_g と f_v の間の関係

また図中の黄色の点線は、過去に行った、吸音材による自励音の抑制を目指した研究から得られた空力自励音の有無の境界線である⁽¹⁰⁾。これによって予測される自励音発生領域は管群列数 N 、音響減衰比 ζ により表すと次式のようになる。」

$$\zeta < 0.0023N \quad \dots \dots (5)$$

つまり、音響減衰比が大きく管群列数が少ないほど自励音はよく抑制されるということである。これは 2・4 節で述べた結果からも確認できる。図 8 から、 $N=1, 3$ までは管群列数が少ないため小さな音響減衰比でも自励音は観測されていないことがわかり、式(5)の予測とよく一致している。

しかし、 $N = 5$ 以上では、円が大きく自励音の発生しているものもあるが、式(5)による自励音発生予測範囲内でも、 $N=5$ 列のパター

ン 3, N=7 列のパターン 1, 2, そして N=9 列のパターン 1 の 4 つの状態のプロット点は小さく、自励音は確認されなかった。これらの条件では、ゴム板は吸音材を用いた場合以上の自励音抑制効果が得られたことになる。この理由については、現段階では不明であり今後の課題としたい。

(5) まとめ 本研究において得られた、ダクト内に装着した柔軟壁(ゴム板)が空力自励音の挙動に与える影響は以下の通りである。

- (1) ゴム板をダクト内側壁全面に装着することは空力自励音の抑制に効果がある。ただしその効果はゴム板に加わる張力に影響され、張力が大きくなると空力自励音が発生する場合もある。
- (2) ゴム板に加わる張力が大きいほど、ダクト内の音響減衰比は小さくなる。
- (3) 管群列数が少ないほど、高い張力のゴム板でも空力自励音の抑制が可能となる。
- (4) 過去の実験との比較から、ゴム板をダクト内壁全面に装着した場合、ダクト内の音響減衰比が大きくなり、空力自励音が抑制されるという推測が成り立つ。
- (5) N=5 列以上では、従来の自励音発生予測に反し、吸音材以上の自励音抑制効果が得られた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 石原 国彦, 為平 泰祐, 辻 政範, “ボイラ管群で発生する空力自励音のバッフル板による対策メカニズムに関する研究”, 日本機械学会論文集(C 編), 78 巻, 787 号, (2012), pp749-757
- ② 石原 国彦, 為平 泰祐, 辻 政範, 日野 順市, キャビティを有するボイラ管群のバッフル板による空力自励音対策法に関する研究, 日本機械学会論文集(C 編), 78 巻, 787 号, (2012), pp.758-769

[学会発表] (計 5 件)

- ① Tamehira Taisuke, Kunihiko Ishihara, Hino Junichi and Tsuji Masanori, “S Study on a Countermeasure of Self-Sustained Tone by a Baffle Plate in Boiler Tube Banks with Cavity”, proceedings of Internoise2011, 2011.9.6, 大阪
- ② Takahashi Takeshi and Kunihiko Ishihara, “Study on a

Countermeasure of Self-Sustained Tones in a Boiler Tube Bank,”、proceedings of Internoise2011、2011.9.6、大阪

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原 国彦 (ISHIHARA KUNIHICO)

徳島文理大学・保健福祉学部

臨床工学科・教授

研究者番号：30380108

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし