

平成 28 年 5 月 18 日現在

機関番号：36102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420199

研究課題名(和文) ボイラ管群ダクトから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 a countermeasure for high level sounds generated from a boiler tube bank duct

研究代表者

石原 国彦 (Ishihara, Kunihiko)

徳島文理大学・保健福祉学部・教授

研究者番号：30380108

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ボイラなどの熱交換器は発電所や製紙工場で重要な機器である。しかし稼働時に大音響騒音を発生することがある。それが発生すると近隣住民からの苦情などにより工場停止を余儀なくされ大きな損失となる。本研究は大音響騒音を防ぐための方法としてダクト側壁に穴あき板を設けることを考えその有効性について実験的に明らかにしたものである。その結果、(1)穴あき板は空力自励音の抑制に非常に効果がある。開口率が1%～32%で実験したがすべての開口率で効果が確認できた。またその抑制効果は開口率に影響され、開口率が大きくなるにつれて音圧レベルのO.A.値は減少する、などが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Heat exchangers such as boilers are important equipment in industrial fields. However these boilers are operated a high level sound is generated and it becomes a cause of complaints from neighbors and a large amount of cost loss. The present study aims to propose a new and reasonable countermeasure and to clarify the usefulness experimentally. As a result, it was clarified that perforated plates with over 1% of aperture ratio can suppress the high level sound effectively and the suppression effects are dependent on aperture ratio and the SPL decreases with increasing the aperture ratio.

研究分野：工学

キーワード：熱交換器 空力自励音 バッフル板 穴あき板 開口率 音響減衰 騒音抑制効果

1. 研究開始当初の背景

ボイラ、ガス加熱器のような熱交換器ではある運転条件になると大音響騒音が発生する^{(1)~(5)}。そのためこの大音響騒音の発生原因ならびに有効な対策実現の必要性が生じた。従来この問題に対しては管群内にバッフル板を挿入することで解決を図っていたが、挿入方法などは確立されていなかった^{(6)~(7)}。そこで新しく、簡単な対策法の出現が求められていた。

2. 研究の目的

これまでの研究において筆者はダクト壁をゴム板のような柔軟壁にすることで音響モードを作らないというアイデアを提案し、実験的にその有効性を確認した⁽⁸⁾。しかしながらこれを実機に適用するには熱などの問題があり難しいことが分かった。そこで新しいアイデアとして穴あき板を空気層を設けて設置する方法を提案した。本研究はその有効性および有用性を実験的に明らかにするものである。

3. 研究の方法

図1に実験装置を示す。穴あき板の開口率をパラメータとして流速を変えて騒音レベルとダクト壁面静圧を計測する。開口率として図2に示す1%、2%、4%、8%、16%、32%の6種類と穴無し(0%)の7種類とした。穴あき板は厚み2.3mmで穴の径は3mmとした。流れはブロアから出し、流速はインバータの周波数で変化させた。壁面静圧はデジタルマンオメーターで計測した。騒音は騒音計で計測し、スペクトルも併せて求めた。

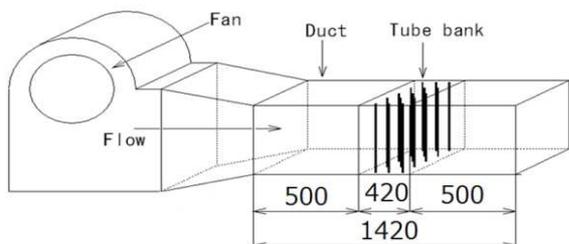


図1 実験装置

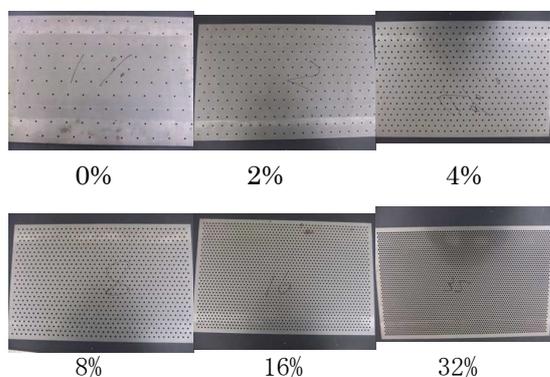


図2 各種開口率を有する穴あき板

4. 研究成果

4.1 開口率0% (穴無し) の場合の音圧レベルおよび音圧スペクトル

開口率が0% (穴無し) の板を用いた場合について送風実験の際の音圧レベルを図3に示す。音圧レベルは自励音が発生するまでは流体騒音の特徴である流速の6乗(本実験では5乗に近く、それを図中の破線で示す)に比例しているが、自励音が発生すると突然大音響の音圧レベルを示す(赤丸で示す)。

実験ではインバータ周波数の最大値が60Hzであるため、これ以上の流速は得られなかったが、これまでの実験結果からこれ以上流速を上げて音圧レベルは飽和する。この実験では自励音発生流速(隙間流速)が20m/sであることから、そのときの渦の放出周波数は $St=0.22$ として $f_v = St \cdot U/D = 0.22 \times 20/0.006 = 733\text{Hz}$ となる。一方ダクト内音場のダクト幅方向の気柱共鳴周波数は

$$f_a = c_e / 2L = 340/2/0.234 = 726\text{Hz}$$

であり、長手方向の連成モードを考えると736Hzとなり、自励音の実測周波数740Hz(後出)とほぼ一致している。ここで c_e は管群がある場合の有効音速で、式(3)で与えられる⁽⁹⁾。

$$c_e = \frac{c}{\sqrt{1+\sigma}} \quad (\sigma \text{ は充填率}) \quad (1)$$

ここで充填率とは全体に対して管群が占める割合であり、図1に示す長さ1420mmを1つの領域と考えると $\sigma = 0.0145$ となり、管群存在の音速に与える影響は無視できる。したがってここでは $c_e = c$ とした。

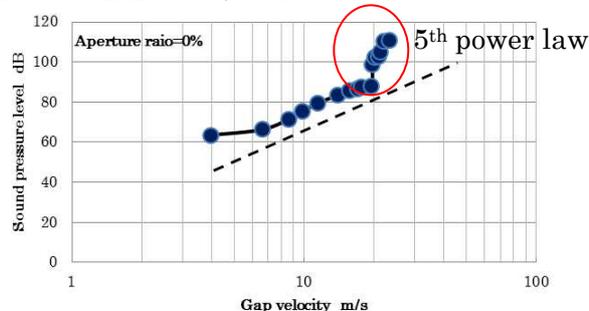


図3 開口率0%の流速に対する音圧レベル

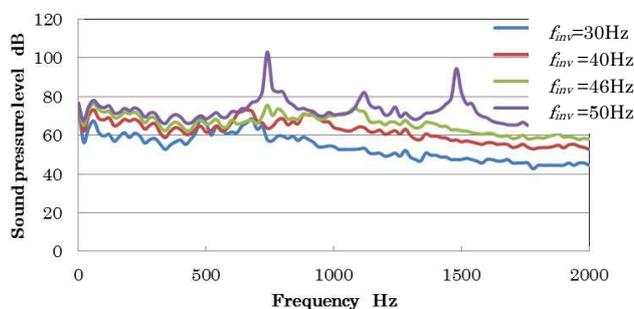


図4 開口率0%の音圧スペクトル

図4は各インバータ周波数における音圧スペクトルを示す。インバータ周波数が30, 40, 46, 50Hzのときの流速はそれぞれ11.5,

15.7, 21.3, 23.2m/sである。

インバータ周波数が46Hzあたりから自励音がかすかに聞こえ、50Hzでは図に示すように明瞭なピーク周波数を持つ自励音が発生している。このピーク周波数は740Hzで前述の音場の気柱共鳴周波数と一致している。

図5は開口率がそれぞれ0%, 1%, 2%, 4%, 8%, 16%, 32%の穴あき板を側壁に適用したときの流速と壁面静圧との関係を示したもので、いずれの開口率でも静圧は流速のほぼ2乗に比例していることがわかる。ここで図中にPress01などと示しているのは1%の場合の静圧という意味である。また赤の点線で示したものは2乗に比例する線である。この図を見ると開口率により静圧は大きさが異なる。すなわち開口率が大きいほど管群前後の差圧が小さい。これは壁面に開けられた穴を流体が通り抜けるため流れ易くなる、すなわち流れ抵抗が小さくなりそれが圧力損失の減少につながったためである。

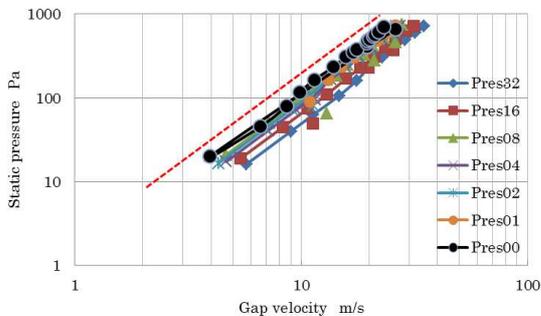


図5 開口率と壁面静圧の関係

4.2 種々の開口率を有する穴あき板を用いた場合の音圧レベルおよび音圧スペクトル

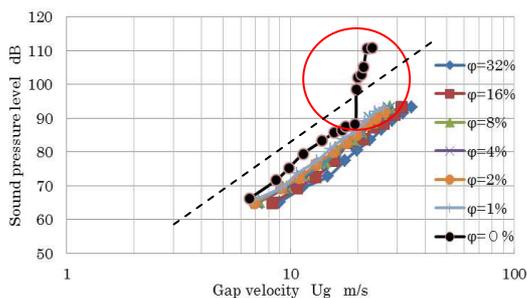


図6 開口率と音圧レベルの関係

次に開口率を種々変えた穴あき板を挿入した場合の流速と音圧レベルの計測結果を図6に示す。図中破線で示したものは流速の5乗に比例する音圧レベルである。一般に双極子音源による流体騒音の強さは流速の6乗に比例すると言われているが本実験でのダクト内で発生する流体騒音は5乗則に従う結果となった。5~6乗則に沿う騒音は通常の流体騒音である。開口率は図2に示した0%, 1%, 2%, 4%, 8%, 16%, 32%の7種類である。この図より0%の開口率、す

なわち穴無し板を用いた通常のダクトでのみ空力自励音が発生し、1%~32%の開口率の穴あき板をダクト壁面に適用すると5乗則に沿った通常の音圧レベルの上昇となり自励音が発生しないことがわかる。しかしながら開口率が1%と32%とでは音圧レベルに大きな差があり、同じ流速、例えばUg=20m/s(赤線)のときphi=32%(32%開口率)では80.9dBであったものがphi=1%(1%開口率)になると87.1dBとなりその差は約6dB、すなわち音のエネルギーにして約4倍の差となる。この事実より開口率によって騒音抑制効果が異なると推測される。そこで流速一定の場合の開口率と音圧レベルの関係を求めたところ図7の実線のようになった。

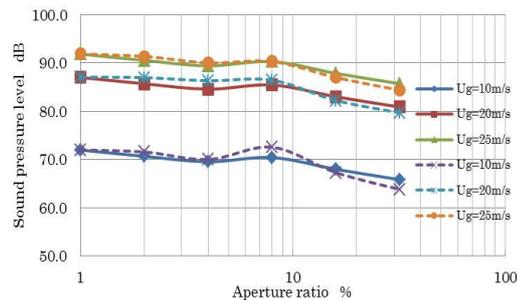


図7 開口率と音圧レベルの関係

この図よりいずれの流速においても開口率と音圧レベルの関係は同様の傾向を示し、開口率8%を除き開口率が大きくなるにつれて音圧レベルは減少する。そしてある開口率以上になると音圧レベルも一定値に収束すると予想される。また開口率8%のみ特異な音圧レベルを示している。これらについては今後確認する予定である。

管群前後の差圧を用いて $30\log(\Delta P / 0.5\rho u^2)$ を計算し、開口率1%の音圧レベルを基準として他の開口率の音圧レベルを求めたものを図中の破線で示す。実線と点線はほぼ一致しており、管群前後の差圧の比較から音圧レベルの減少量を推測することができたことがわかった。

もし穴あき板が吸音特性を有するとすれば、一般に低周波側で吸音効果が小さく、高周波側で大きくなる。

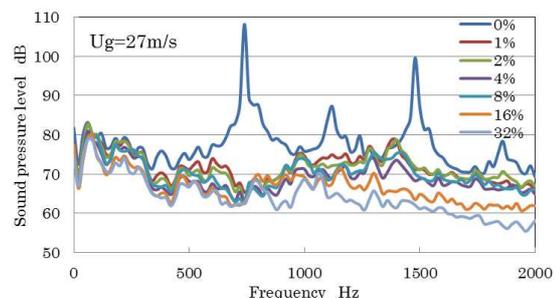


図8 開口率と音圧スペクトル

図8は隙間流速Vg=27m/sにおける各開口率の穴あき板を用いた場合の音圧レベルを

計測した音圧スペクトルである。これを見ると開口率が 16%と 32%は高周波側で音圧レベルが下がっており、32%が最も吸音効果が大いことがわかる。したがって穴あき板は吸音材の役割をしていると言える。

4.3 開口率に対する音響減衰の周波数特性

図9に開口率を種々変えた場合の音響減衰比の周波数特性を示す。この音響減衰比はスピーカを用い正弦波掃引試験を行い、マイクでダクト内音圧を測定し、共鳴曲線から半値幅法で求めたものである。共鳴曲線の例を図10の(a'), (b')に示す。これらは縦軸を音圧レベル(dB)として表している。これらの2つの図(上側と下側)は比較的良く似た周波数応答を示すものと同じ図に示しており、基準となる周波数応答として開口率0%, すなわち穴なし板を用いた場合のそれをいずれの図にも太線で示している。

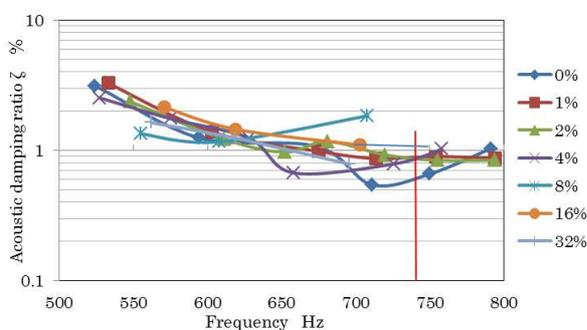


図9 開口率と音響減衰の関係

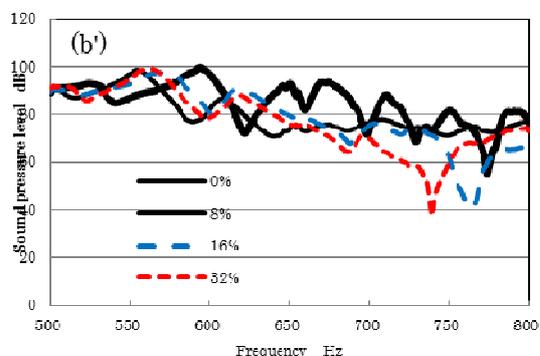
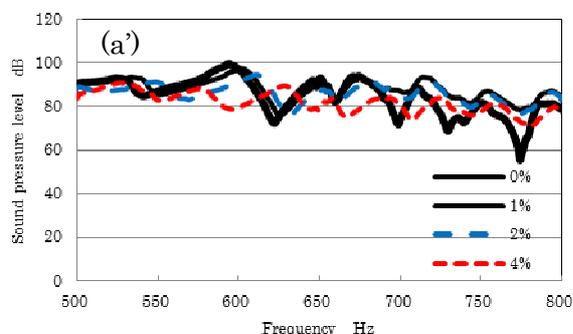


図10 音圧レベルにお周波数応答

図10の(a')は1%, 2%, 4%の場合の周波数応答を示しており、それらは同様の傾向

を示し開口率が小さくなるにつれて0%の周波数応答に近づいていることがわかる。一方、図10の(b')は8%, 16%, 32%の場合の周波数応答を示しており、それらもお互いよく似た形をしているが図10(a')とは異なっている。すなわち開口率が小さい場合は周波数が高くなっても音圧レベルは0%の場合と変わらずまた卓越周波数も多い。一方、8%以上になると共鳴周波数が550Hzあたりに移動し、音圧レベルも高周波数になるほど下がり、卓越周波数がなくなる。これは開口率が大きくなると音場の境界条件が変化するためである。特に8%, 16%と32%の場合はそれぞれ図(b')からわかるように771Hz, 762Hzと740Hzで音圧レベルが急激に下がり、あたかも共鳴型消音器を取り付けたようになっていいる。しかしながら式(2)で計算される共鳴周波数 f_r はそれぞれ1413Hz, 999Hzであること、式(2)では開口率が大きいほど共鳴周波数が高くなるのに対し、実験の応答では低くなっている。

したがって、これらの音圧レベルの落ち込みは穴あき板の板厚と開口率および空洞から成る共鳴器によるものではないと言える。

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(t+0.8\phi)L}}$$

(2)

ここで、 c は音速、 P は開口率、 t は板厚、 ϕ は穴径、 L は空洞深さである。

図10(a'), (b')からわかるように1つの実験において共鳴する周波数が複数あり、それぞれの共鳴点で求めた音響減衰をプロットしたものが図9である。

図9より音響減衰は一般に周波数の増大とともに減少する傾向があることがわかる。

今問題としている自励音の周波数740Hz近傍における音響減衰比は開口率0%のとき0.60%で最も小さく、それ以外の開口率では0.8%以上となっている。図11は先に行った柔軟壁を用いた実験結果であり⁽⁵⁾、柔軟壁

(ゴム板)をダクトに貼り、管群列数を3, 5, 7, 9列と変えて、各管群列数に対し張力を変えて音響減衰を測定し、自励音発生の有無を調べたものである。パターン0は剛壁の場合、パターン1, 2, 3, 4はそれぞれ張力の大きさが順に大きくなっていることを示す。本実験では管群列数を $N=9$ と固定しているの、図11の赤の楕円で示した部分に着目している。この実験では図11の赤の楕円で示したように1%以上で自励音が消滅したが、今回は0.8%以上で消滅した。若干の違いがあるものの本管群では $\pm 1\%$ あたりが自励音発生の境と言える。図中黄色で示す線は著者の一人が吸音材を壁面に貼付して音響減衰と管群列数を変えて空力自励音の発生の有無を調べた実験で得られた空力自励音発生限界を示すもので、右下の領域で空力自励音が発生する。

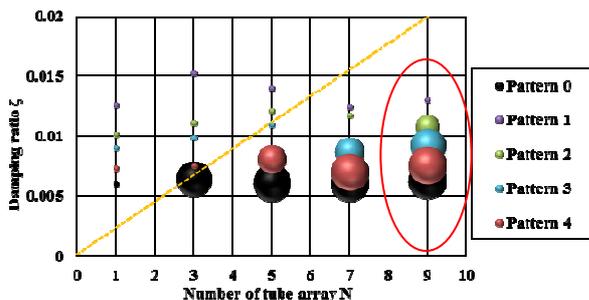


図 11 管列数とゴム張力に対する音響減衰比の関係

結論

本研究において得られた、ダクト内に装着した穴あき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) 穴あき板をダクト内側壁に空気層を持って装着することは空力自励音の抑制に非常に効果がある。開口率が 1%~32% で実験したがすべての開口率で効果が確認できた。
- (2) ただしその抑制効果は開口率に影響され、開口率が大きくなるにつれて音圧レベルの O. A. 値は減少する。しかも高周波域でそれが強く現れる。すなわち穴あき板は吸音材としての効果を有することが明らかになった。本実験結果によれば異音が生じていない流体騒音に対して開口率 1% と 32% で約 6dB の差があった。
- (3) 開口率が 4% 以下と 8% 以上の穴あき板ではダクト幅方向の共鳴周波数が 740Hz から 556Hz に急激に変化することから 4~8% の間で音響的に閉と開の境界条件の違いが現れる。この結果は著者が以前行った実験結果と同じであり、本実験でも確かめられた。
- (4) 管群列数 N が 9 列の本実験では開口率が 1% 以上の穴あき板では空力自励音が発生しなくなる。そのときの音響減衰率は 0.9% である。この値はすでに実施した吸音材貼付、柔軟壁利用で測定した臨界音響減衰比（それぞれ 2%, 1%）より小さく、吸音力以上の働きを有している可能性を示唆している。
- (5) 管群前後の差圧 ΔP の比較から音圧レベルの減少量 ΔLp を $\Delta Lp = 30 \log(\Delta P / 0.5 \rho u^2)$ の式で推測することができる。このことから空力自励音でない流体騒音を低減させるには管群前後の差圧を減らすのが効果的である。

<引用文献>

- (1) 石原国彦, “2 つの並列管群ダクトを有するガス加熱器の異音に関する研究: 第 1 報, 現象の把握”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 70, No.689 (2004a), pp.

126-132.

- (2) 石原国彦, “2 つの並列管群ダクトを有するガス加熱器の異音に関する研究: 第 2 報, 孔あきバツフル板の音響減衰特性とその効果”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.70, No.689 (2004b), pp.133-139.
- (3) Blevins, R. D., and M. M. Bressler, “Acoustic Resonance in Heat Exchanger Tube Bundles-Part I: Physical Nature of Phenomena, Part II: Prediction and Suppression of Resonance”, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.109 (1987), pp.275-288.
- (4) Blevins, R. D., and M. M. Bressler, “Experiments on Acoustic Resonance in Heat Exchanger Tube Bundles”, Journal of Sound and Vibration, Vol.164, No.3 (1993), pp.503-533.
- (5) 石原国彦, ボイラ・熱交換器で発生する大音響騒音の発生メカニズムに関する研究 (管群本数と音響減衰の音圧レベルへの影響), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 763 (2010), pp. 572-579.
- (6) Baird, R. C., “Pulsation-Induced Vibration in Utility Steam Generation Units”, Combustion, Vol.25, No.10 (1954), pp.38-44
- (7) Cohan, L. J. and W. J. Deane, Elimination of destructive vibrations in large, gas and oil-filtered units, Journal of Engineering for Power, Vol. 87, (1965), pp.223-228.
- (8) 石原国彦, 高橋武史 ボイラ・熱交換器で発生する大音響騒音の柔軟壁を利用した対策法に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79, No. 802 (2013), pp. 1837-1848.
- (9) 石原国彦, 宮本高德, 吉田侑加, 管群を有するダクト内の音速評価に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 75, No. 754 (2009b), pp. 1656-1663.

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 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

- ① Kunihoko Ishihara, Study on a countermeasure using walls made of perforated plate for high level sound, ASME PVP Conference, Boston in USA, 2015. 7
- ② 石原国彦, 中岡正典, 西岡幹人, ボイラ・熱交換器で発生する大音響騒音の穴あき板を利用した対策法に関する研究, 日本機械学会 D&D2015, 弘前大学, 2015. 8
- ③ 石原国彦, 青木梨香子, ボイラ管群ダクトで発生する大音響騒音に対する空洞部付穴あき板の抑制効果に及ぼす空洞部容積の影響について, 日本機械学会中国四国支部第 53 期総会・講演会, 愛媛大学, 2016. 3

④石原国彦、ボイラ管群ダクトで発生する大音響騒音に対する穴あき板の抑制効果に及ぼす穴径の影響について、日本機械学会関西支部第 91 期総会・講演会、大阪電気通信大学、2016.3

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原国彦 (ISHIHARA Kunihiko)
徳島文理大学・保健福祉学部・教授
研究者番号：30380108

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：