

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06232

研究課題名(和文) 渦強度フィードバックのモデル化によるボイラ管群気柱共鳴現象の発生予測法の高精度化

研究課題名(英文) Improvement of prediction method of acoustic resonance in boiler tube banks using feedback model of vortex intensity

研究代表者

濱川 洋充 (Hamakawa, Hiromitsu)

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：30243893

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：管群内の渦の相関長および渦強度フィードバックを考慮して管群気柱共鳴現象の発生予測法の高精度化を試みた。気柱共鳴現象が発生すると、渦の管軸方向の相関長および渦度が増加した。渦のスパン方向相関長の変化を考慮したギャップ流速の修正式を提案した。フィン付き管は等価直径を用いて裸管と同様に扱った。密な管群を通過する噴流には吸音効果がある場合と無い場合とがあり、管間隙間から流出する渦が密接に関与していることが分かった。予測精度の向上には、これらの解明が重要であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ガスタービン用排熱回収ボイラなどにおいて今後も継続して発生する恐れがある気柱共鳴現象によるトラブルの減少に多大に寄与するものである。近年、数値解析技術が急速に発展しているが、管の本数が多い管群内の三次元の流れ場の解析は未だ困難であり、流体・音響・構造が密接に連成した管群音響共鳴現象の正確な発生予測は不可能である。本研究成果は、数値解析の結果の可否を判断するためのベンチマークデータとしても使用できる。

研究成果の概要(英文)：The span wise correlation length and intensity of vortex shedding from in-line tube banks were experimentally investigated. It was easy to generate acoustic resonance of low order transverse mode as the tube pitch ratio in the flow direction increased. As the tube pitch ratio in the flow direction decreased, the acoustic resonance of longitudinal mode occurred. The onset velocity of longitudinal mode were lower than that of transverse mode at the small tube pitch ratios. As the span wise scale of vortex decreased, the peak SPLs decreased, and the onset velocity of each mode of acoustic resonance increased for all acoustic modes. The variation of gap velocity could be predicted by considering the reduction of span wise scale of vortex and the increase of gap velocity kept the peak SPLs. The acoustic absorption performance correlated with the vortex shedding from tube banks for small tube pitch ratio. We have discussed the prediction method of acoustic resonance in tube banks.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：流体関連振動・騒音 音響共鳴現象 渦 管群 ボイラ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

火力発電所の大容量ボイラやコンバインドサイクル発電所において使用される排熱回収ボイラなどの熱交換器では、試運転時に気柱共鳴現象が発生し、振動と騒音が問題になることがある。この現象が発生すると、振動によって構造物が破損する恐れがあるため、数多くの研究が行われている。その結果、本現象が管群から放出されるカルマン渦に起因していることが明らかとなり、様々な設計予測法や防止対策が構築されている。しかしながら、これらの設計法を用いて製造された熱交換器においても今だ気柱共鳴現象が度々発生し、その度に多額の費用と時間を労して防止対策が講じられている。近年においても大手メーカー数社にて数件の発生事例が報告されている。また、このような背景から、設計者の間では発生回避のための高精度の発生予測法の開発が切望されている。

### 2. 研究の目的

本研究は、熱交換器の管群から放出される渦の強度および管軸方向相関長に及ぼす気柱共鳴現象の影響を明らかにするとともに、これらを考慮した高精度の気柱共鳴現象の発生予測法を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

ボイラの相似模型の概要を図 1 に示す。抗力方向 ( $X$  方向) が 1275mm、揚力方向 ( $Y$  方向) が 900mm、管スパン方向 ( $Z$  方向) が 130mm の二次元模型である。揚力方向の共鳴周波数は、気流温度が  $20^\circ$  のとき 1 次モードが約 191Hz、2 次モードが約 382Hz である。

管群は、 $Y$  方向のピッチ比  $T/D$  が 2.0 の格子配列であり、 $X$  方向の管ピッチ比  $L/D$  を 1.4, 1.6, 1.7, 1.8, 2.0, 2.8, 3.5 および 4.0 と変化させた。管直径  $D$  は 9mm であり、管軸は  $Z$  方向に平行である。管群は、揚力方向に 50 列、 $L/D=1.4 \sim 1.8$  のとき抗力方向に 15 列、 $L/D=1.8 \sim 4.0$  のときには抗力方向に 5 列から成る。管群を構成する供試円管の表面は滑らかである。

実験では、装置上流に設置した送風機を用いて、入口における一様流の速度 (管群への主流速度)  $U_\infty$  を 2.5 ~ 16.0m/s の範囲で変化させた。ギャップ流速  $U_g$  は管間の最小断面積における流路の平均流速であり、 $U_g = TU_\infty / (T-D)$  で定義した。このときギャップ流速  $U_g$  は 5.0 ~ 32.0m/s となり、ギャップ流速を用いたレイノルズ数  $Re$  は  $2.8 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^4$  である。

発生音は、管群の側面から外側へ 300mm の位置に精密騒音計を設置して測定した。気柱共鳴現象の音響モードは、図 1 中の●印で示す位置に、流路の内壁面に垂直に埋め込んだ小型騒音計を用いて、音圧変動の振幅と位相関係から求めた。

管群の 3 列目の下流側の両側の側壁面において、気柱共鳴現象による音圧変動を測定した。渦放出特性は、円管の前縁よどみ点から  $90^\circ$  の位置に圧力測定孔を設け、表面圧力変動から求めた。渦放出特性を測定した管の位置は、管群 2 列目と最後列である。

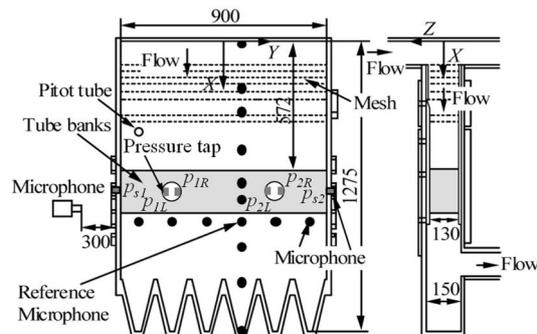


図 1 ボイラ模型実験装置概要

管群内の流れ場の測定には図 2 に示す実験装置を使用した。250mm×500mm の低騒音風洞のノズル下流に格子配列の管群を設置した。管群部の両側には音響透過壁で仕切られた深さ 477mm のキャビティが設置されている。抗力方向 ( $X$  方向) が 1046mm、揚力方向 ( $Y$  方向) が 1454mm、管スパン方向 ( $Z$  方向) が 250mm であり、共鳴周波数は、気流温度が  $10^\circ$  のとき 1 次モードが約 116Hz、2 次モードが約 232Hz、3 次モードが約 348Hz である。

管群の配列は、上述のボイラ模型実験装置と同様とした。管直径  $D$  は 31.8mm であり、管軸は  $Z$  方向に平行である。管群は揚力方向に 5 または 7 列、抗力方向に 4 列、すなわち  $5 \times 4 = 20$  本または  $7 \times 4 = 28$  本から成る。管群は上下壁面に垂直に固定支持されている。

実験では、装置上流に設置した送風機を用いて、入口における一様流の速度 (管群への主流速度)  $U_\infty$  を 10 ~ 40m/s の範囲で変化させた。ギャップ流速  $U_g$  は管間の最小断面積における流路の平均流速であり、 $U_g = TU_\infty / (T-D)$  で定義した。このときギャップ流速  $U_g$  は 20 ~ 80m/s となり、ギャップ流速を用いたレイノルズ数  $Re$  は約  $2.2 \times 10^4 \sim 1.8 \times 10^5$  である。キャビティの側壁面の中央において、気柱共鳴現象による音圧変動を測定した。管群内の流れ場は、高速度カメラ (FASTCAM SA-X2) とレーザー (532nmDPSS グリーンレーザー4W) を用いた

PIV により測定した。

また、管群における吸音率の測定装置の概要を図 3 に示す。94×94mm の矩形のダクトの片端に背後空気層を有する管群および穴あき板を設置し、もう一方の開端側からスピーカーを用いてホワイトノイズを発生させ、伝達関数法により吸音率を測定した。噴流は、背後空気層内部に設置した 2 箇所の流入孔からコンプレッサーを用いて空気を流入させ、管群および穴あき板を用いて発生させた。穴あき板は実験装置および測定方法の検証のために使用した。孔径は、測定のためにレーザーシートの厚さより大きい 10mm であり、厚さ 3.0mm のアルミ板の表面に 4 個を設置した。多孔板の背後空気層の厚さは 50mm で、孔の断面形状は直線状である。流量が安定する持続時間は約 110s であり、この間の 60s にて吸音率の測定を行った。測定には、1/4 インチ音圧音場型マイクロホン (B & K 4187 型) 2 個、プリアンプ (B & K 2670 型) 2 個、マイクロホン用コンディショニングアンプ (B & K 2690-A-OS2)、2ch 小型 FFT 分析器 (RION SA-78) を使用した。また、多孔板下流の速度分布を高速度カメラ (FASTCAM SA-X2) とレーザー (532nm DPSS グリーンレーザー 4W) を用いた PIV より測定した。

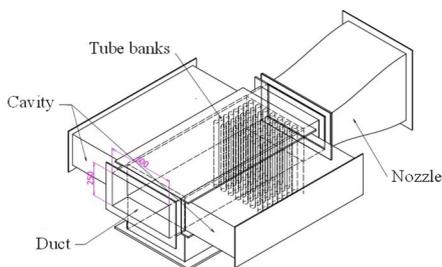


図 2 管群内流れ場の測定用実験装置概要

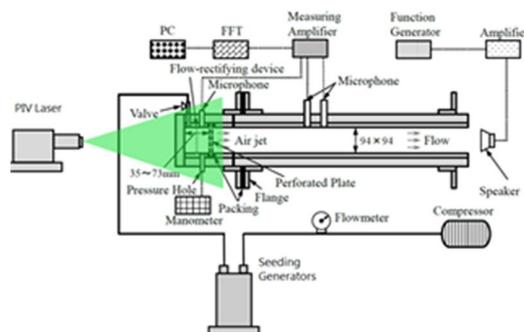


図 3 管群の吸音率測定用実験装置概要

#### 4. 研究成果

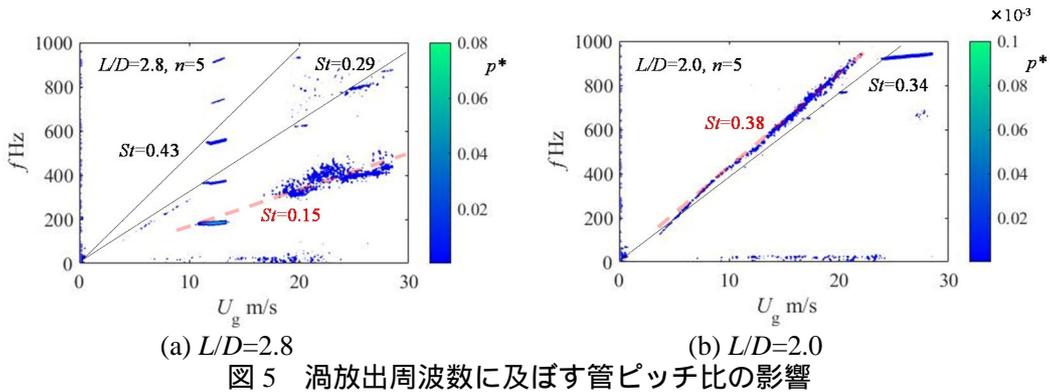
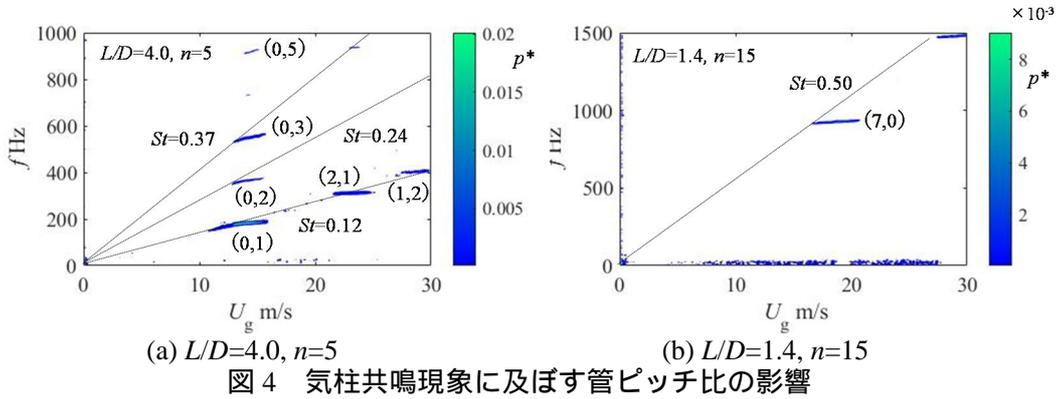
(1) 抗力方向の管配列のピッチ比  $L/D$  を 1.4 から 4.0 と変化させたときの気柱共鳴現象の発生特性を実験的に調査した。気柱共鳴現象発生時には、音圧レベルのスペクトルには単一のピークが形成された。ギャップ流速  $U_g$  を増加させたときのピーク周波数の変化を図 4 に示す。流速を増加させると気柱共鳴現象が発生しロックインが生じ、ピーク周波数が階段状に変化した。図 4 中の括弧は、壁面に設置したマイクロホンの位相差から求めた気柱共鳴現象のモード次数を表している。抗力方向モード次数  $n_x$ 、揚力方向モード次数  $n_y$  とすると  $(n_x, n_y)$  である。

格子配列管群の抗力方向管ピッチ比  $L/D$  が 4.0 から 2.8 では、図 4 (a) に示すようにギャップ流速が増加するにつれて揚力方向 1 次モードと 2 次モードの気柱共鳴現象が発生した。 $L/D$  が 2.0 になると、揚力方向モードが発生し難くなり、抗力方向モードが発生しやすくなった。また、管群本数を増加させると、揚力方向モードが発生しやすくなった。図 4 (b) はさらに管ピッチ比  $L/D$  が小さい場合の結果である。 $L/D$  が小さくなると、さらに揚力方向モードが発生し難くなり、抗力方向モードが発生しやすくなる。

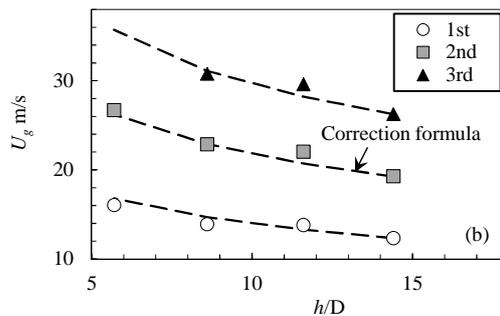
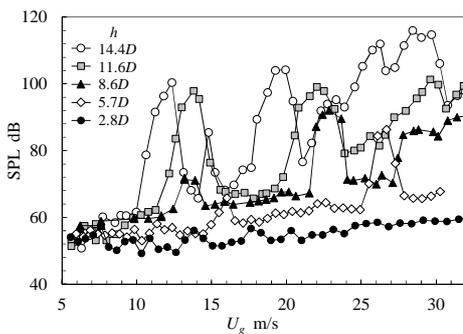
$L/D$  を 4.0 から 1.4 と変化させて測定管表面の圧力変動スペクトルのピーク周波数の変化を測定した。圧力変動のスペクトルには、渦放出によるピークが形成されており、格子配列管群の抗力方向管ピッチ比  $L/D$  が 4.0, 3.5, 2.8 では、それぞれストローハル数  $St$  は 0.12, 0.13, 0.15 となった。これらは壁面音圧の揚力方向モードの気柱共鳴現象のストローハル数と一致した。 $L/D=2.8$  の結果を図 5 (a) に示す。さらにピッチ比が小さく  $L/D$  が 2.0 になると、図 5 (b) に示すようにストローハル数  $St$  は 0.38 と急増し、抗力方向の気柱共鳴現象が発生した。 $L/D$  が 1.8, 1.7, 1.6, 1.4 では、それぞれストローハル数  $St$  は 0.45, 0.49, 0.61, 0.64 となった。

管表面の 2 つの圧力変動の位相差を測定したところ、 $L/D$  が 4.0, 3.5, 2.8 ではそれぞれ  $St=0.12, 0.13, 0.15$  で逆位相となった。管群内では交互渦が放出されていると考えられる。管ピッチ比  $L/D$  が 2.0, 1.7, 1.6, 1.4 と小さくなると、ストローハル数  $St=0.38, 0.45, 0.49, 0.61, 0.64$  では若干周期性が弱まり、逆位相が明確に現れず同位相が混じる傾向が見られた。管ピッチ比が小さな管群内では、交互渦と対称渦が時間的に交じり合って放出されていると考えられる。この対称渦放出によって抗力方向モードが低流速から発生したと考えられる。

(2) 気柱共鳴現象発生時に、管群から放出される渦の管軸方向の挙動を調べたところ、管軸方向に位相が揃って放出されており、相関長が極めて増大することが分かった。管群から放出される渦の管軸方向相関長は管軸方向の流路幅と密接に関係すると考えられることから、管群の上流に、揚力方向に平行にオリフィスを設置し、流路幅  $h$  を変化させて、気柱共鳴現象の発生に及ぼす影響を調査した。図 6 は、ギャップ流速  $U_g$  に対する外部騒音計の音圧レベル SPL の変化を表している。管群の上流にオリフィスを設置しない場合 ( $h=14.4D$ )



には、 $U_g$  が約 12m/s で揚力方向 1 次モードの共鳴現象が、約 19m/s で 2 次モードが発生した。また、流路幅  $h$  が小さくなるにつれて、それぞれの発生流速が増加した。渦放出音の強さは、流速の 6 乗に比例することから、流路幅減少によって流速が増加し共鳴の励起力が増し、発生流速が低流速になると予想されるが、発生流速はむしろ増加した。これは、流路幅が狭くなったことに伴う渦の管軸方向の相関長の減少の影響と考えられる。管群から放出される渦の管軸方向相関長は管軸方向の流路幅と密接に関係しており、管軸方向の渦の相関長が増加すると、気柱共鳴現象が発生しやすくなる。図 7 は、共鳴発生流速に及ぼす流路幅の影響である。補正式を用いることによって、共鳴発生流速に及ぼす相関長の影響を見積もることができる。



(3) レイノルズ数が  $1.0 \times 10^5 \sim 1.3 \times 10^5$  において、フィン付き円柱から発生する空力音に及ぼすフィン傾斜の影響を実験的に検討した。音圧レベルのスペクトルの比較を図 8 に示す。裸管にフィンピッチ比が 0.27 ~ 0.44 のスパイラルフィンおよびフラットフィンがあると、空力音のスペクトルのピーク音圧レベルが低下することが分かる。フィンピッチ比が 0.44 のときが最もピークレベルが低く、励起力が小さくなる。フィンピッチ比が 0.27 の場合にはスパイラルフィンの方が音圧レベルの低減に有効であるが、0.44 の場合にはフラットフィンの方が良い。流速に対するピーク音圧レベルの変化を図 9 に示す。フィン形状およびピッチが変化しても、およそ流速の 6 乗に比例し増加するが、フィン形状によって渦の相関長および周期性が影響を受けるため、若干のばらつきが見られる。

(4) 背後空気層を有する管群および穴あき板の吸音特性に及ぼす気流の影響を実験的に調査した。図 10 は、穴あき板から噴流を発生させたときの垂直入射吸音率  $\alpha$  の周波数特性で

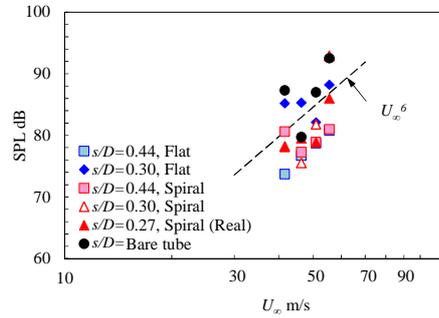
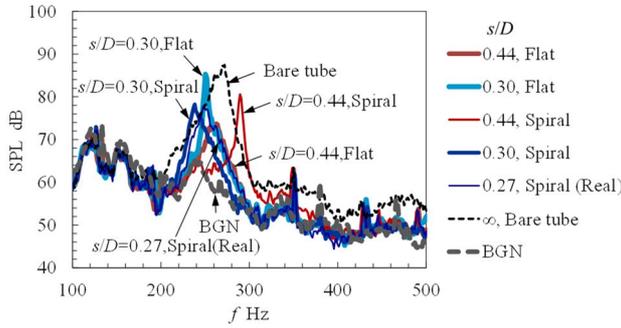


図 8 音圧レベルのスペクトルの比較 図 9 流速に対するピーク音圧レベルの変化

ある．吸音率は周波数が増加するにつれて増加し，極大となり，さらに周波数が増加すると減少する．また，最大値は，流量が増加するにつれて増加する．吸音率の最大値は 0.96 となった．図 10 中の丸印は， $Q=50\text{l/min}$  のときの吸音率  $\alpha$  の予測結果である．実験結果とよく一致している．

図 11 は孔下流の渦度の分布であり，図 11(a) は音を入射しない場合，図 11(b) は 120dB の純音を入射した場合の結果である．赤が時計回り，青が反時計回りの渦度を表している．純音を入射しているときの方が渦度が強く，入射音と同じ 500Hz の間隔で渦が発生している．孔を通過する流れがあるときに吸音率が増加する原因は，入射音によって孔出口において強い渦が生成され，音響エネルギーが消費されるためと考えられる．

管列の場合にも多孔板と同様に流量が増加するにつれて吸音率が増大した．スピーカーで純音を入射すると，孔出口付近では入射周波数で流速が周期的に変化した．吸音率が増大する場合としない場合について，流れ場の様子を比較し，音響減衰が増加する原因について検討した．予測式の精度向上について検討した．

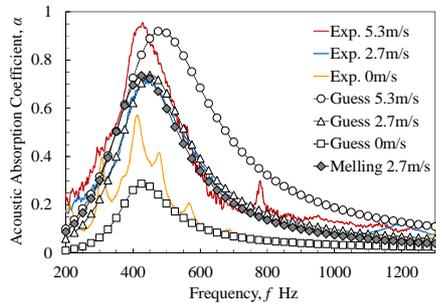


図 10 吸音率の予測

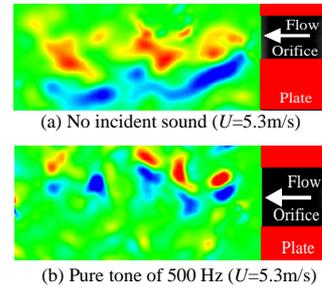


図 11 オリフィス下流の渦度分布

(5) 抗力方向の管配列のピッチ比が 2.8，揚力方向が 2.0 の格子配列管群において，気柱共鳴現象の発生特性を実験的に調査した．キャビティ壁面の音圧レベルのスペクトルには単一のピークが形成された．このピーク周波数  $f_p$  は，図 12 に示すようにギャップ流速  $U_g$  が増加するにつれて気柱共鳴現象が発生し，ロックインが生じて階段状に変化した．図 13 は，ギャップ流速に対する壁面音圧  $p$  の変化である．気柱共鳴現象発生時には音圧が大となる．

気柱共鳴現象の発生に及ぼす音響減衰比の影響について実験的に調査した．音響減衰比が比較的大きいとき，渦放出周波数と共鳴周波数が一致すると気柱共鳴現象が発生するが，本実験装置では音響減衰比が小さく，引き込み現象が発生し，渦放出周波数と音響共鳴周波数とが一致する前から気柱共鳴現象が発生した．気柱共鳴現象発生時には，管群から放出される渦は管軸方向に位相が揃っており，渦度が増大した．予測式の改良を行い，予測精度向上について検討した．

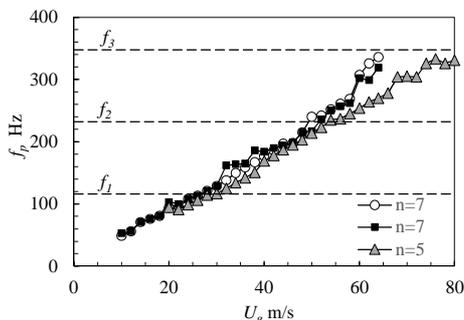


図 12 ギャップ流速とピーク周波数との関係

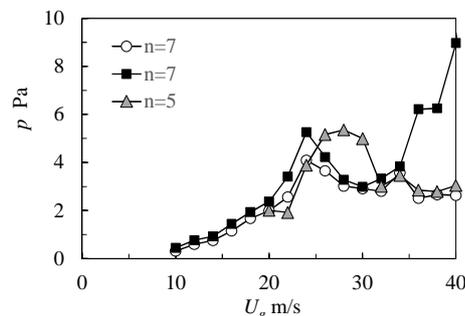


図 13 ギャップ流速と壁面音圧との関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiromitsu Hamakawa Satoshi Hino Eiichi Nishida Eru Kurihara	4. 巻 PVP2017-65913
2. 論文標題 Phase Characteristics of Vortex Shedding from Tube Banks on Acoustic Resonance	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels & Piping Conference	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Hino, Takahisa Mizoguchi, Hiromitsu Hamakawa, Eiichi Nishida, Eru Kurihara	4. 巻 No.081
2. 論文標題 Effect of Flow Separation on Acoustic Resonance in In-line Tube Banks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 4th Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 溝口貴久, 山名浩太, 濱川洋充, 西田英一, 栗原央流
2. 発表標題 気柱共鳴現象発生時の管群内および最後列の管からの渦放出特性
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 溝口貴久, 山名浩太, 濱川洋充, 西田英一, 栗原央流
2. 発表標題 気柱共鳴現象時の音圧変動と管群からの渦放出との関係
3. 学会等名 日本機械学会九州支部北九州講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 溝口貴久, 山名浩太, 濱川洋充, 西田英一, 栗原央流, 林秀千人
2. 発表標題 気柱共鳴現象時のボイラ管群内の音圧変動と渦放出との関係
3. 学会等名 第38回流力騒音シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日野聡志, 溝口貴久, 濱川洋充, 西田英一, 栗原央流
2. 発表標題 管群から放出される渦の同期化に及ぼす管群配列の影響
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山名浩太, 溝口貴久, 濱川洋充, 栗原央流, 林秀千人
2. 発表標題 フィン付き円柱から発生する空力音に及ぼすフィン形状の影響
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第71期総会・講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Zhou, Y., Kimura, M., Peng, G., Lucey, A.D., Huang, L., Hamakawa, H.	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer Singapore	5. 総ページ数 344(359-364)
3. 書名 Fluid-Structure-Sound Interactions and Control	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	西田 英一  (Nishida Eiichi)  (70410032)	湘南工科大学・機械システム工学科・教授    (32706)	
連携研究者	林 秀千人  (Hayashi Hidechito)  (10173022)	長崎大学・工学部・教授    (17301)	