

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420178

研究課題名(和文) 排熱回収用ボイラにおける気柱共鳴現象の新しい高精度発生予測法の構築

研究課題名(英文) Improvement of prediction method of acoustic resonance in tube banks of exhaust heat recovery boiler

研究代表者

濱川 洋充 (Hamakawa, Hiromitsu)

大分大学・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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：管群気柱共鳴現象の発生予測法の高精度化を試みた。後流振動子を用いて管群からの渦放出現象をモデル化すれば、渦放出の同期性に関しては渦励振と同様に気柱共鳴現象の発生を予測できることがわかった。このときフィン付き管は等価直径を用いれば裸管と同様に扱うことができる。また、背後空間を有する密な管群を通過する噴流には吸音効果があることが分かった。更なる予測法の高精度化には、管群から放出される渦の渦度フィードバックの解明とモデル化が重要であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We have proposed the new prediction method of acoustic resonance in tube banks of exhaust heat recovery boiler. The phase characteristics of vortex shedding were experimentally investigated in in-line tube banks. As a result, the following conclusions were obtained. The phase delay between pressure drop at measured tube and acoustic pressure on the side wall as a function of gap velocity during the occurrence of acoustic resonance. The phase decreased from about -0.5 to - as the gap velocity increased. This value agreed well with the result of theoretical one. The acceleration feedback for the coupling condition between sound field and wake oscillator were effective. The effects of a tube vibration on Karman vortex shedding were similar to those of acoustic resonance on vortex shedding without tube vibration.

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

### 1. 研究開始当初の背景

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用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[Chen (1968), 根本ら (1997), Pettigrew (2003), Eisingerら (2005), Ziada (2010), 石原ら (2010) など]。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。昨年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、排熱回収用ボイラなどの熱交換器で発生することがある気柱共鳴現象の高精度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

実機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°のとき1次モードが約191Hz、2次モードが約382Hzである。

管群の主要寸法と配列を図2に示す。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1.44~4.0とした。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、抗力方向は $L/D=1.44\sim 1.87$ のとき15列、 $L/D=2.8\sim 4.0$ のとき5列から成る。管群は実験装置内部の上下壁面に垂直に固定支持しており、管群を構成する各供試円管の表面は滑らかである。

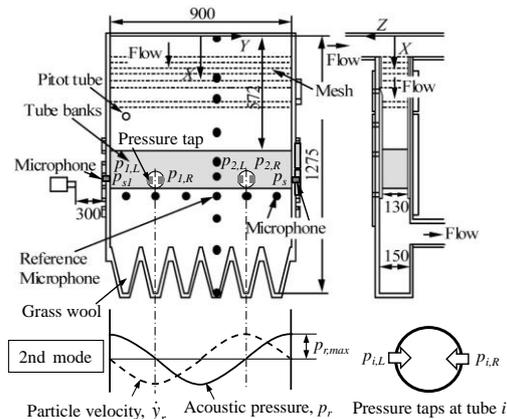


図1 実験装置概要

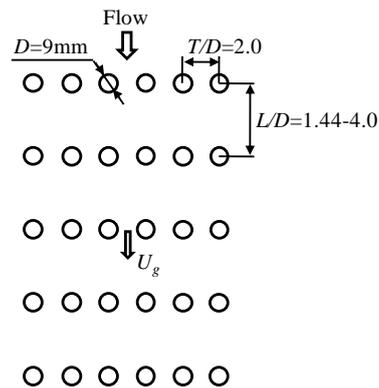


図2 管群配列の様式

気柱共鳴現象の発生特性に関する実験では、 $L/D=1.44\sim 4.0$ において、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 $2.5\sim 15.0$  m/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、 $U_g=U_\infty(T-D)$ で定義した。このときギャップ流速 $U_g$ は $5\sim 30.0$  m/sとなり、ギャップ流速を用いたレイノルズ数 $Re$ は約 $10^3\sim 10^4$ である。

渦放出の同期性に関する実験では、 $L/D=3.0$ において、揚力方向1と2次モードの気柱共鳴現象を測定対象として、 $U_\infty$ を $3.5\sim 7.5$  m/s、 $7.5\sim 12.5$  m/sの範囲で低速から高速へと連続的に変化させた。このときギャップ流速 $U_g$ は $7\sim 15$  m/s、 $15\sim 25$  m/sとなり、ギャップ流速を用いたレイノルズ数 $Re$ は約 $10^3\sim 10^4$ である。

管群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。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。渦放出特性は、図1に示すように円管の前縁よみ点から90°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5列目である。揚力方向の位置は、左右の側壁からそれぞれ13本目(両者の間には24本の管がある)であり、この位置は図1下図に示すように揚力方向の2次モードの気柱共鳴現象発生時の粒子速度の腹(音圧分布の節)である。さらに、ダクト中心に位置する揚力方向の1次モードの気柱共鳴現象発生時の粒子速度の腹(音圧分布の節)においても測定を行った。

また、低騒音風洞を用いて複数の裸管およびフィン付き管から発生する渦放出音の特性を実験的に調査した。さらに、音響インピーダンス管に管列および多孔板を設置して、吸音特性とそれに及ぼす流れの影響についても調査した。

#### 4. 研究成果

(1) Y. N. Chen が提案した気柱共鳴現象の発生予測パラメータの有効性をボイラの相似模型試験装置を用いて実験的に検証した。

$$\Psi = \frac{Re}{St} \left( 1 - \frac{1}{X_L} \right)^2 \frac{1}{X_T}$$

ここで  $Re$  はレイノルズ数,  $St$  はストローハル数,  $X_L$  は  $X$  方向の管ピッチ比 ( $=L/D$ ),  $X_T$  は  $Y$  方向のピッチ比 ( $=T/D$ ) である. 図3は発生予測パラメータ  $\Psi$  と気柱共鳴現象発生域との比較である. 揚力方向モードの共鳴現象は基準値が2000以上で発生しており, Chenのパラメータでおおよそ発生予測が可能であることが分かる.

図4は抗力方向モードについて比較した結果である. 抗力方向モードの共鳴は基準値が600以上で発生しており, 基準値600を用いれば, 抗力方向モードの共鳴の発生予測も可能であることが分かる.

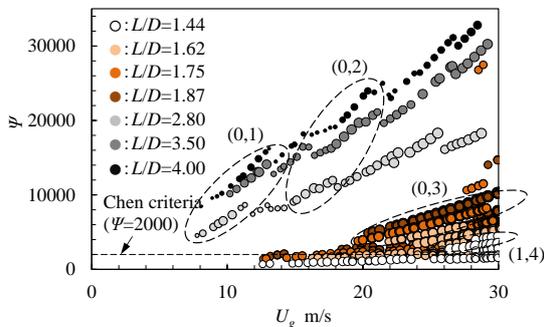


図3 揚力方向の気柱共鳴現象と Chen パラメータとの比較

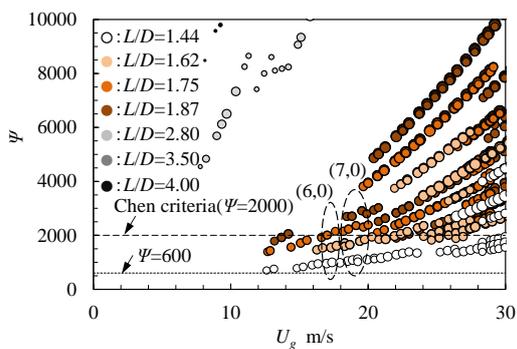


図4 抗力方向の気柱共鳴現象と Chen パラメータとの比較

(2) 後流振動子を用いて渦放出現象をモデル化し渦励振と同様に扱えば, 壁面音圧と管に作用する揚力変動の間の位相差は気柱共鳴現象発生前後で  $-\pi/2$  の位相差が生じることが理論的に明らかにされている. 抗力方向の管ピッチ比が3.0, 揚力方向の管ピッチ比が2.0の格子配列管群において, 管揚力と壁面音圧との位相関係を実験的に調査した. 図5はギャップ流速と壁面音圧との関係である. 1次モードと2次モードの気柱共鳴現象が発生し, 壁面

音圧が増加することが分かる. 図6 (a) と (b) はそれぞれ1次モードと2次モードの気柱共鳴現象発生前後の管揚力と壁面音圧との位相差である. どちらも気柱共鳴現象発生前後で  $-\pi/2$  の位相差が生じることが分かる. 以上から, 後流振動子を用いて渦放出現象をモデル化すれば, 渦励振と同様に気柱共鳴現象の発生を予測できることが分かった. なお, 渦励振の場合には, フィン付き管は等価直径を用いれば裸管と同様に扱うことができる. 気柱共鳴現象の場合にも同様であると考えられる.

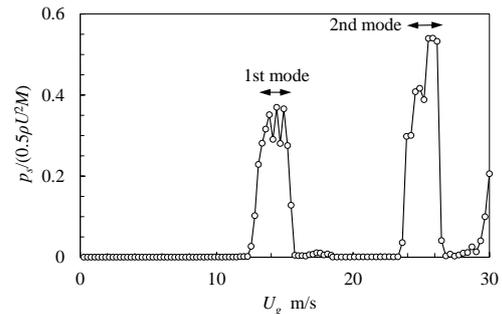
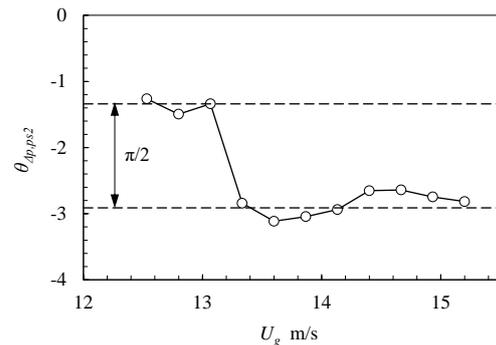
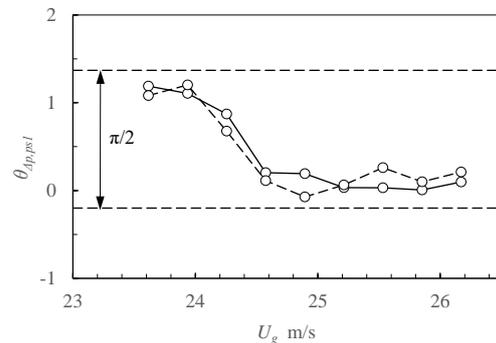


図5 気柱共鳴現象の発生流速域



(1) 1次モード

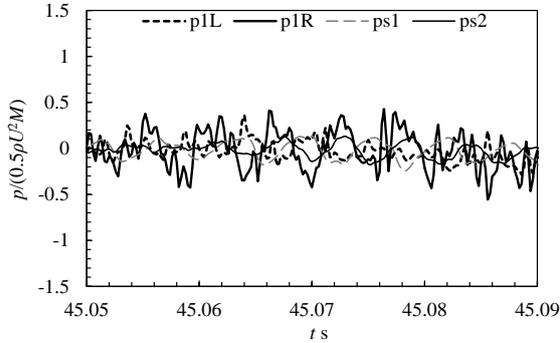


(2) 2次モード

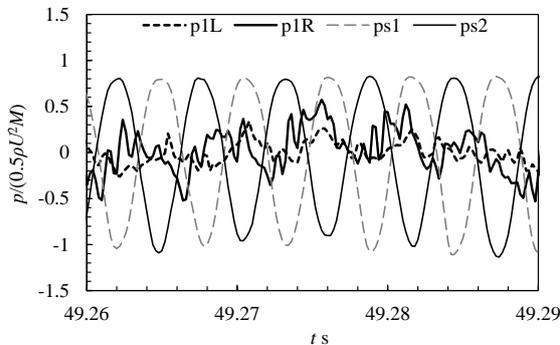
図6 気柱共鳴現象発生前後の壁面音圧と揚力変動との位相差

(3) 気柱共鳴発生前後の壁面音圧と管に作用する揚力変動との関係を実験的に調査した. 図7 (a) は気柱共鳴発生前のギャップ流速  $U_g=12.0\text{m/s}$  であり, 徐々にギャップ流速を増加させたときの結果を (b), (c), (d) に示

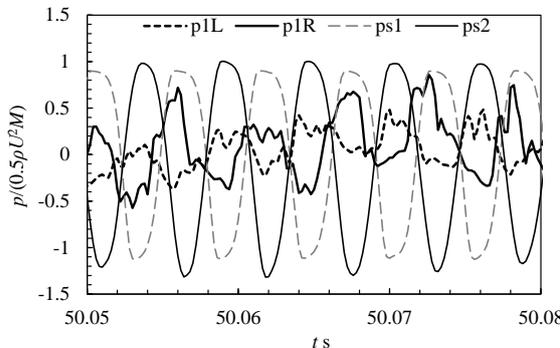
す。まず最初に壁面音圧が増加し、その後には管に作用する揚力変動の位相差が同期するとともに揚力変動の振幅が増大することが分かる。したがって、気柱共鳴現象の発生予測には、管群からの渦放出の同期性だけでなく、過度へのフィードバック機構の解明とモデル化も重要であると考えられる。



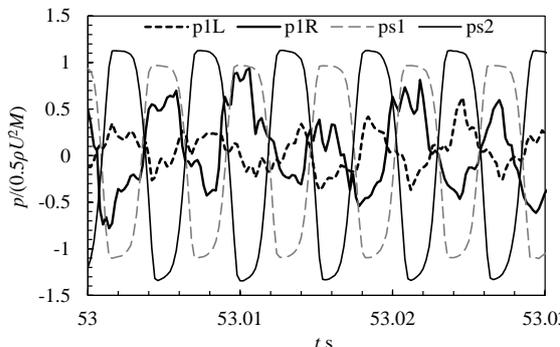
(a)  $U_g=12.0$  m/s



(b)  $U_g=13.1$  m/s



(c)  $U_g=13.3$  m/s



(d)  $U_g=14.1$  m/s

図7 気柱共鳴現象発生前後の壁面音圧と管に作用する揚力との関係

(4) 背後空気層を有する多孔板および管列の吸音率に及ぼす噴流の影響を実験的に明らかにするとともに、A. W. Guess が提案した多孔板の理論式による吸音率と比較検討した。図8は吸音率に及ぼす背後空気層の影響である。吸音率の周波数分布には極大値が存在し、背後空気層厚さが増加するにつれてピーク周波数が増加した。管列についても同様の傾向が見られた。多孔板の板厚が減少するにつれてピーク周波数は増加した。理論式において孔内を通過する粒子速度のマッハ数および多孔板に平行な流れのマッハ数に仮定した値を用いれば、理論値の傾向が実験結果とほぼ一致した。密な管列は大局的に見れば、二次元の多孔板とみなす事ができることから、本理論式は気柱共鳴現象の抑止設計に応用できると考えられる。

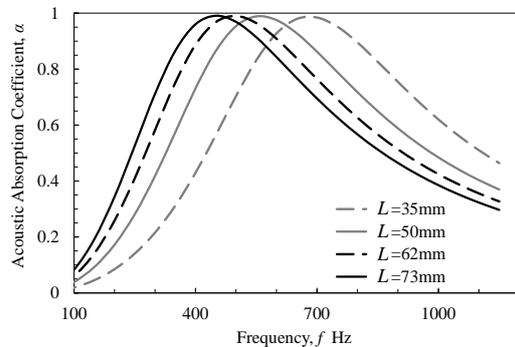


図8 吸音率に及ぼす背後空気層の影響

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

① Hiromitsu Hamakawa, Satoshi Hino, Eiichi Nishida, Eru Kurihara, Phase Characteristics of Vortex Shedding from Tube Banks on Acoustic Resonance, Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2017, PVP2017-65913, 査読有, 2017, pp.1-9.

② Hiromitsu Hamakawa, Eiichi Nishida, Yuta Asai, Kouki Mimura, Hidechito Hayashi, Eru Kurihara, Characteristics of Vortex-acoustic Interaction in In-line Tube Banks of Heat Exchanger, FIV2016, 査読有, 2016, pp.1-6.

③ Hiromitsu Hamakawa, Hiroki Matsuoka, Taiki Yamai, Kenta Asakura, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Eru Kurihara, Eiichi Nishida, Acoustic Absorption Characteristics of Perforated Thin Plate with Air Jets and Cavity, Open Journal of Fluid Dynamics, Vol.5, 査読有, 2015, pp.1-9. <http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2015.51001>

④ Ryo Yamashita, Hidechito Hayashi, Tetsuya Okumura, Hiromitsu Hamakawa, Mechanism of Tonal Noise Generation from Circular Cylinder with Spiral Fin, Journal of Thermal Science,

⑤ Hiromitsu Hamakawa, Takaaki Adachi, Hiroki Matsuoka, Kazuki Hosokai, Eiichi Nishida, Eru Kurihara, Hidechito Hayashi, Aeolian Tone Radiated from a Circular Cylinder with Solid Spiral Fin in Cross Flow, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.9, No.4, Paper No.14-00161, 査読有, 2014, pp.1-10.  
DOI: 10.1299/jfst.2014jfst0053

⑥ Hiromitsu Hamakawa, Hiroki Matsuoka, Kazuki Hosokai, Eiichi Nishida, Eru Kurihara, Characteristics of Aerodynamic Sound Radiated From Two Finned Cylinders, Proceedings of ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2014, PVP2014-28855, 査読有, 2014, pp.1-9.

⑦ Eiichi Nishida, Hiromitsu Hamakawa, Study on Stability Analysis on Acoustic Resonance in Heat Exchanger Tube Bundles, Proceedings of ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2014, PVP2014-29042, 査読有, 2014, pp.1-10.

[学会発表] (計 21 件)

① Hiromitsu Hamakawa, Masanori Miyazaki, Yuta Asai, Eru Kurihara, Eiichi Nishida, Hidechito Hayashi, Prediction of Acoustic Absorption Characteristics of Perforated Plate with Air Jets, 6th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, Guilin (China), September 20, 2016.

② 濱川洋充, 西田英一, 日野聡志, 浅井悠太, 栗原央流, 林秀千人, 気柱共鳴現象発生時の管群から放出される渦の同期化に関する研究, Dynamics and Design Conference 2016, 2016年8月25日, 山口大学工学部 (山口県宇部市常盤台)

③ 大里佑太郎, 濱川洋充, 宮崎真昇, 西田英一, 栗原央流, 林秀千人, 背後空気層を有する多孔板の吸音特性に及ぼす微小噴流の影響, 第26回環境工学総合シンポジウム2016, 2016年7月1日, 金沢歌劇座会議室棟 (石川県金沢市下本多町)

④ 濱川洋充, 山井太貴, 西田英一, 大鶴徹, 富来礼次, 林秀千人, 栗原央流キャビティを有する多孔板の吸音特性に及ぼす気流の影響, 第93期日本機械学会流体工学部門講演会, 2015年11月8日, 東京理科大学 (東京都新宿区神楽坂)

⑤ 三村洸貴, 山井太貴, 濱川洋充, 西田英一, 林秀千人, 栗原央流, 管群気柱共鳴現象の発生予測に関する研究, 日本機械学会九州

支部長崎講演会, 2015年9月24日, 長崎大学 (長崎県長崎市文教町)

⑥ 濱川洋充, 山井太貴, 三村洸貴, 西田英一, 栗原中流, 林秀千人, 気柱共鳴発生時の管群から放出される渦の同期化指標値の実験同定 Dynamics and Design Conference 2015, 2015年8月26日, 弘前大学 (青森県弘前市文京町)

⑦ Hiromitsu Hamakawa, Taiki Yamai, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Eiichi Nishida, Hidechito Hayashi, Eru Kurihara, Effect of Geometry of Perforated Plate with Air Jets on Acoustic Absorption Characteristics, 12th International Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, Lercini (Italy), July 15, 2015.

⑧ 濱川洋充, 西田英一, 松岡博紀, 山井大貴, 栗原央流, 気柱共鳴現象発生前後における格子配列管群からの渦放出の特性, 第92期日本機械学会流体工学部門講演会, 2014年10月26日, 富山大学 (富山県富山市五福)

⑨ 濱川洋充, 松岡博紀, 細貝和希, 栗原央流, 波力発電用ウエルズタービンから発生する空力騒音に関する研究, 第72回ターボ機械協会大分講演会, 2014年10月3日, 大分高専 (大分県大分市牧)

⑩ 濱川洋充, 細貝和希, 松岡博紀, 栗原央流, 林秀千人, 設計流量時における軸流ファンの動翼後縁からの渦放出に関する研究, 第72回ターボ機械協会大分講演会, 2014年10月3日, 大分高専 (大分県大分市牧)

⑪ 山下良, 林秀千人, 濱川洋充, 奥村哲也, 二次元定常解析による円柱列流れの簡易予測 (二円柱の場合), 第72回ターボ機械協会大分講演会, 2014年10月3日, 大分高専 (大分県大分市牧)

⑫ Hiroki Matsuoka, Taiki Yamai, Kenta Asakura, Hiromitsu Hamakawa, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Eru Kurihara, Acoustic Absorption Characteristics of Perforated Plate with Jets and Cavity, 5th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, Nagasaki (Japan), September 26, 2014.

⑬ Hidechito Hayashi, Ryo Yamashita, Tetsuya Okumura, Hiromitsu Hamakawa, Mechanism of Tonal Noise Generation from Circular Cylinder with Spiral Fin, 5th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, Nagasaki (Japan), September 24, 2014.

⑭ Kazuki Hosokai, Hiromitsu Hamakawa, Eru Kurihara, Hidechito Hayashi, Characteristics of

Velocity Fluctuation near Trailing Edge of Rotor Blade of Axial Flow Fan, 5th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, Nagasaki (Japan), September 24, 2014.

⑮ 細貝和希, 松岡博紀, 濱川洋充, 西田英二, 栗原央流, 林秀千人, フィンピッチが大きなソリッドフィン付き円柱から発生する空力音の特性, 日本機械学会九州支部大分地方講演会, 2014年9月20日, ホルトホール大分 (大分県大分市金池南)

⑯ 村上貴亮, 松岡博紀, 細貝和希, 栗原央流, 濱川洋充, 多孔質流動モデルを用いたフィン付き円柱の流れ解析, 日本機械学会九州支部大分地方講演会, 2014年9月20日, ホルトホール大分 (大分県大分市金池南)

⑰ 松岡博紀, 山井太貴, 濱川洋充, 西田英二, 栗原央流, 気柱共鳴現象時の管群から放出される渦と共鳴音圧変動との関係, 日本機械学会九州支部大分地方講演会, 2014年9月20日, ホルトホール大分 (大分県大分市金池南)

⑱ 山井太貴, 松岡博紀, 濱川洋充, 大鶴徹, 富来礼次, 栗原央流, キャビティを有する密な管群および多孔板の吸音特性に関する研究, 日本機械学会九州支部大分地方講演会, 2014年9月20日, ホルトホール大分 (大分県大分市金池南)

⑲ 濱川洋充, 松岡博紀, 足立貴昭, 西田英二, 栗原央流, 林秀千人, 流れ中のフィン付き円柱から発生する渦放出音に及ぼすフィンピッチの影響, 2014年度年次大会, 2014年9月8日, 東京電気大学 (東京都足立区千住旭町)

⑳ 濱川洋充, 西田英二, 松岡博紀, 朝倉健太, 山井太貴, 栗原央流, ボイラにおける気柱共鳴現象発生時の管群から放出される渦の同期化特性, Dynamics and Design Conference 2014, 2014年8月26日, 上智大学 (東京都千代田区紀尾井町)

㉑ Hidechito Hayashi, Ryo Yamashita, Tetsuya Okumura, Hiromitsu Hamakawa, Mechanism of Tonal Noise Generation from Circular Cylinder with Spiral Fin, The 21st International Congress on Sound and Vibration, Beijing (China), July 14, 2014.

〔図書〕 (計1件)

(1) 藤本登, 中曾 浩一, 深井潤, 篠原嘉一, 宮崎康次, 永井大樹, 濱川洋充, その他多数, 第4節 排熱回収用ボイラにおける気柱共鳴現象の防止対策と課題, 未利用熱エネルギー活用の新開発と【採算性を重視した】熱省エネ新素材・新製品設計/採用のポイント, 査読

有, 2014, pp.478-485.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

濱川 洋充 (HAMAKAWA, Hiromitsu)  
大分大学・工学部・教授  
研究者番号 : 30243893

### (2)連携研究者

西田 英一 (NISHIDA, Eiichi)  
湘南工科大学・工学部・教授  
研究者番号 : 70410032

林 秀千人 (HAYASHI, Hidechito)  
長崎大学・工学部・教授  
研究者番号 : 10173022