

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560222

研究課題名（和文） 管群構造物における音響共鳴現象の発生メカニズムの解明と
防止設計法への応用研究課題名（英文） Research on acoustic resonance phenomenon in tube banks
and prevention design method

研究代表者

濱川 洋充 (HAMAKAWA HIROMITSU)

大分大学・工学部・准教授

研究者番号：30243893

研究成果の概要（和文）：

発電所の大容量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。本研究では、実機ボイラの二次元相似模型を用いて、様々な配列の管群内の渦放出特性と本現象の発生特性を実験的に解明した。これらの結果に基づき管群内の渦の同期性に着目した気柱共鳴現象の新しい発生予測パラメータを提案し、実験的に検証するとともに発生予測に利用できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In heat exchangers such as commercially used boilers, acoustic resonant noise is occasionally generated in ducts when gas flows laterally with respect to the axis of the tubes. We have clarified the characteristics of vortex shedding, acoustic damping, acoustic resonance, feedback effect and vortex shedding synchronization in two dimensional boiler model. The new modeling method of vortex shedding synchronization was proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：機械力学

科研費の分科・細目：機械・工学・機械力学・制御

キーワード：音響エネルギー，流体関連振動・騒音

1. 研究開始当初の背景

発電所の大容量ボイラや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、構造物が破損する恐れがあるため、1960年代から数多くの研究が行われてきた[最近では Pettigrew (2003 review), Eisinger (2005), Ziada (2010) など]。その結果、本現象が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きた[Chen

(1968), Weaver (1987), Fitz-hugh (1973), Eisinger (1995), 根本 (1997), 西田 (2002) 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気柱共鳴現象は度々発生し、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きた。

2. 研究の目的

(1) 様々な配列の管群および伝熱管において、気柱共鳴現象の発生特性、各共鳴モード毎の音響減衰特性、渦放出特性との関連性を

実験的に調査し、管群における気柱共鳴現象の発生メカニズムを解明する。

(2) 新しい設計パラメータを提案し、防止設計法の高精度化を試みる。さらに、その有用性を実験結果にて検証する。

3. 研究の方法

図1に示す実機ボイラの1/30スケールの二次元相似模型試験装置を用いて、実験的に研究を行った。本装置には、図2に示すような管群が設置されており、様々な管群配列で気柱共鳴現象の発生特性を調査できる。さらに、低騒音風洞を用いて排熱回収用ボイラなどで使用されるフィン付き伝熱管から発生する渦放音音の特性を実験的に調査した。

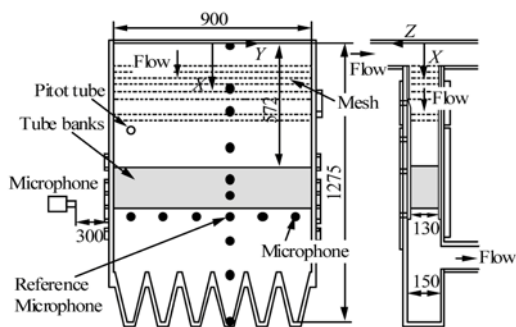


図1 実験装置の概要

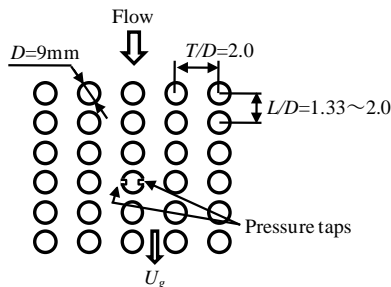


図2 管群配列の仕様

4. 研究成果

(1) 図3はギャップ流速 U_g を変化させて測定した気柱共鳴現象の発生周波数 f_p の変化である。抗力方向の管ピッチ比 L/D が 1.33 の管群では、共鳴開始流速を用いたストローハル数が 0.26 と 0.52 でそれぞれ揚力方向モードと抗力方向モードの気柱共鳴現象が発生する。このときの揚力方向の気柱共鳴現象は 4 次モードである。

抗力方向の管ピッチ比が 1.44 と 1.56 の管群では、揚力方向 2, 3, 4 次モードの気柱共鳴現象が発生し、管ピッチ比が揚力方向 1 次モードの発生限界を超えているにもかかわらず 1 次モードは発生しない。抗力方向モードの気柱共鳴現象は管ピッチ比が 1.33 の管

群と同様にストローハル数 0.52 で発生する。

抗力方向の管ピッチ比が 2.0 の管群では、1.33~1.56 の管群と比べ、低流速から揚力方向 1, 2, 3 次モードの気柱共鳴現象が発生し、音圧レベルが最大となる。

管群の抗力方向の管ピッチ比が増加するにつれて揚力方向の低次モードの気柱共鳴現象が低流速から発生する傾向がある。このとき、発生する高次モードの音圧レベルは流速の増加にともない大きくなる。

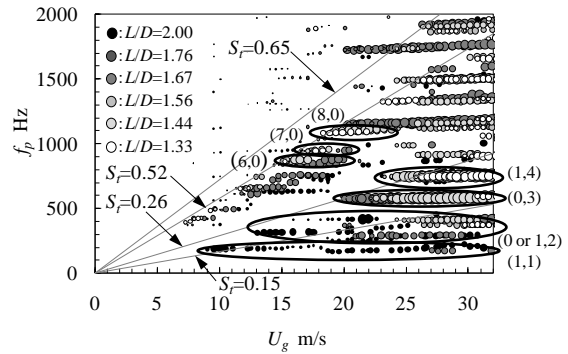


図3 気柱共鳴現象の発生周波数の変化

(2) 図4は管ピッチ比 L/D に対する音響減衰比 ζ の変化である。管揚力方向モードの音響減衰比は、管群の抗力方向の管ピッチ比が小さいほど大きく、モード次数が大きいほど小さくなる。管抗力方向モードも揚力方向と同様であるが、モード次数が 5 以上ではほぼ等しくなる。

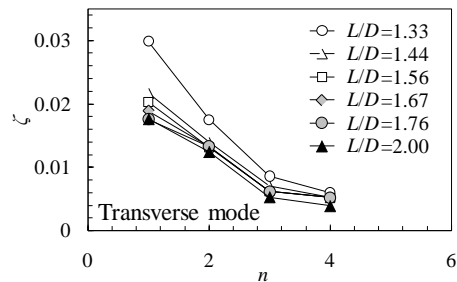


図4 管ピッチ比に対する音響減衰比 ζ の変化

(3) 図5は管ピッチ比 L/D に対する管群前後差圧 Δp の変化である。管群前後の圧力損失はギャップ流速の 2 乗に比例して増加しており、管群の抗力方向の管ピッチ比が大きいほど圧力損失は大きく、図3に示すように気柱共鳴現象の開始流速が低速になる。

(4) 図6は管群配列が $L/D=1.33$ のときの管群内の管の表面圧力変動の短時間スペクトルである。抗力方向の管ピッチ比が小さい格子配列管群では、渦が広周波数帯域で発生し

ており、流速が増加するにつれて、その周波数帯域が広がる傾向がある。この周波数帯域に含まれる共鳴モードの中で、音響減衰比が小さく、共鳴周波数と渦放出周波数が一致する頻度が高いものが発生しやすい。

図7は実験によって得られた気柱共鳴現象の開始流速を用いたストローハル数 S_f と既存のマップとを比較した結果である。測定した管群内の渦放出周波数はRaeとWharmbyらのマップの読みとはほぼ一致する。また、揚力方向モードの気柱共鳴現象の開始流速を用いたストローハル数はFitz-hughのマップの読みとはほぼ一致する。渦放出周波数には幅が有り、RaeとWharmbyらとFitz-hughのマップの間のストローハル数では気柱共鳴現象が発生する可能性があると考えられる。

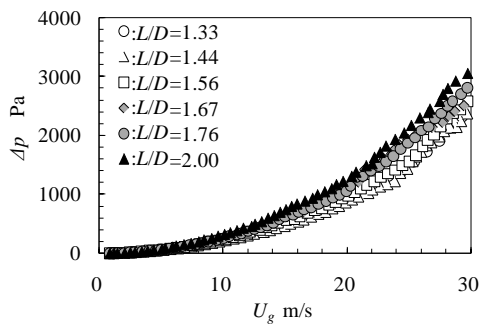


図5 管群前後差圧の変化

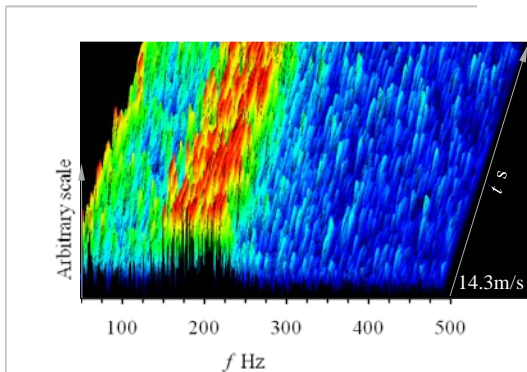


図6 表面圧力変動の短時間スペクトル

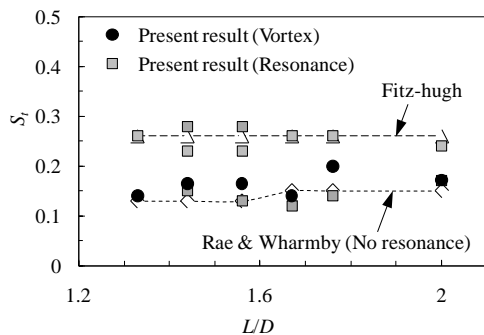


図7 測定したストローハル数とマップとの比較

(5) 抗力方向の管ピッチ比が4.0、揚力方向が2.0の格子配列管群では、図8のようにギャップ流速 U_g を用いたストローハル数 S_f が約0.15で渦が放出されており、このストローハル数で気柱共鳴現象が発生する。この管群では、ギャップ流速が12.3m/sのとき約175Hzの、19.4m/sでは約300Hz、28.5m/sでは約430Hzの気柱共鳴現象が発生する。このときの共鳴モードはそれぞれ揚力方向1次、2次、3次モードとなる。これらの気柱共鳴現象発生時には音圧レベルが増加する。

図9(a)と(b)に示すように揚力方向2次モードの気柱共鳴現象発生時には、渦放出と気柱共鳴現象の音圧変動とのコヒーレンス C_s が大きくなり、位相差 θ_s が遅れはじめ、やがて逆位相となる。すなわち粒子速度に同期して渦が放出されている。

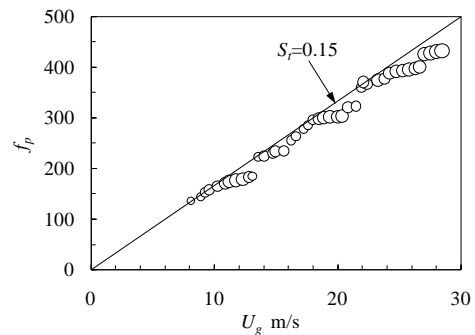
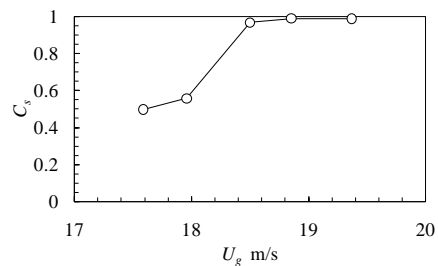
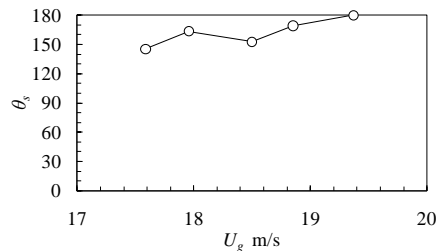


図8 音圧レベルのピーク周波数の変化



(a) コヒーレンス



(b) 位相差

図9 管表面圧力変動と気柱共鳴音の関係

(6) 管群内の渦放出の同期性が気柱共鳴現象の発生に密接に関係している。渦の同期しやすさを表す新しいパラメータを提案し、実験により検証した。本パラメータは気柱共鳴現象の発生予測に利用できることがわかった。

(7) 図 10 はフィンのピッチを変化させたときの音圧レベルのスペクトルである。縦軸は裸管のピークレベルを基準にした相対音圧レベルである。レイノルズ数が $1.1 \times 10^5 \sim 1.9 \times 10^5$ 付近において、ツイストセレイティッドフィン付き円柱のフィンピッチ比 s/D が 0.27 の場合には、渦放出の周期性が増し、音圧レベルのスペクトルのピークレベルが裸管よりも若干高くなる。フィンピッチ比が 0.16 の場合には、フィン外径サイズの裸管と比べ音圧レベルのピークレベルが約 11.9dB、ピッチ比が 0.11 では約 15.8dB 減少する。

フィン付き円柱後流には周期性の強いカルマン渦が形成されており、図 11 に示すようにその放出周波数は音圧レベルのピークの周波数と一致する。レイノルズ数が 1.1×10^4 から 5.5×10^4 では、渦放出周波数は流速に比例し増加し、フィンピッチ比が小さいほど渦放出周波数は低下する。一方、レイノルズ数が 7.6×10^4 から 1.9×10^5 では、フィンピッチ比が 0.11 と 0.16 のとき、渦放出周波数はフィン外径サイズの裸管と一致する。

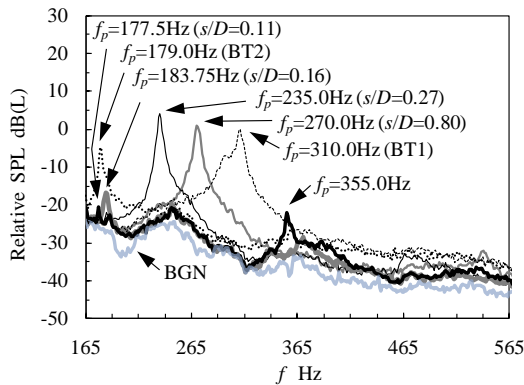


図 10 音圧レベルに及ぼすフィンピッチの影響

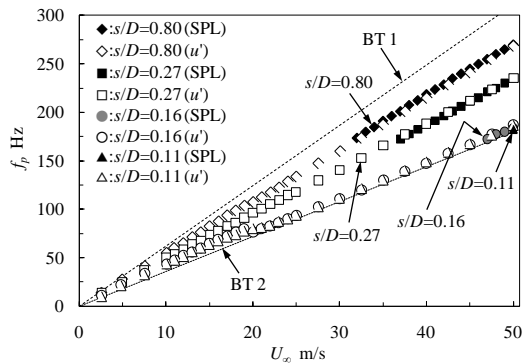


図 11 主流速度に対するピーク周波数の変化

(8) フィンのピッチが小さいとき、フィン付き円柱の等価直径はレイノルズ数に依存する。レイノルズ数を考慮した等価直径の算出式を新たに提案した。この方法により、図 12 に示すようにフィン付き円柱からの渦放出周波数が裸管と同様に予測できることがわかった。

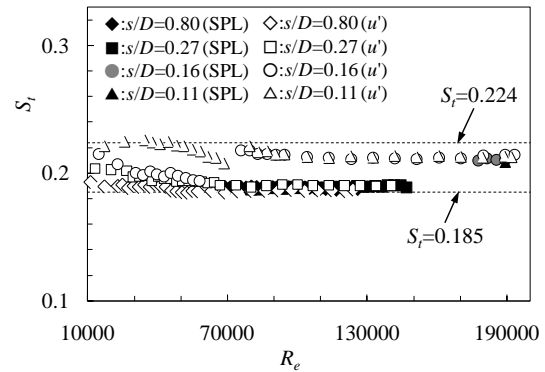


図 12 等価直径を用いたストローハル数の変化

(9) フィン付き管後方には渦放出に起因する対称な二つの速度変動強さ最大点が存在し、フィンピッチが小さくなるにつれて、その位置が下流側へ移動する。この速度変動強さ最大点における速度変動と渦放出音との相関は、図 13 のコヒーレンス C_{xy} に示すようにフィンのピッチ s/D が小さくなるにつれて減少する。

フィン付き円柱後方のカルマン渦の span 方向の相関長さはフィン外径サイズの裸管よりも若干大きい。裸管と比べ渦放出音が増大したフィンのピッチが 0.27 のときに、相関長さが最も大きくなる。

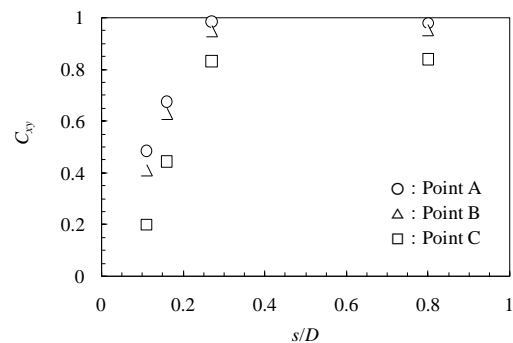


図 13 空力音と速度変動とのコヒーレンス

(10) ツイストセレイティッドフィン付き円柱の周りに、直径が 3~9mm の螺旋状側板を 3 本が平行になるように等価直径の 5 倍のピッチで設置すると、図 14 に示すように空力音のピークレベルが減少する。螺旋状側板には渦放出音を低下させる効果がある。

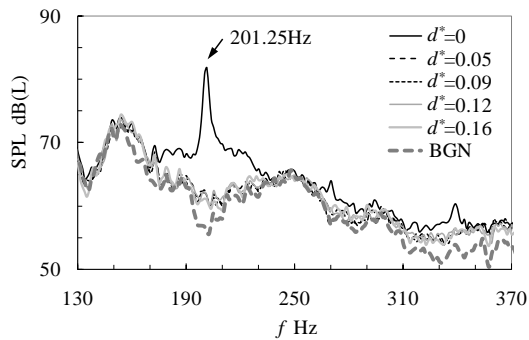


図 14 空力音に及ぼす螺旋状側板の影響

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 16 件)

- ① H. Hamakawa, K. Muraoka, E. Nishida, T. Fukano, Vortex Shedding from Tube Banks with Closely Mounted Serrated Fin, Journal of Environment and Engineering, 査読有, Vol. 6, No.1, 2011, pp.69-80
- ② H. Hamakawa, H. Miyagi, E. Nishida, Effect of Cavities inside Tube Banks on Acoustic Resonance, Journal of Thermal Science, 査読有, Vol.19, No.1, 2010, pp.67-71
- ③ 濱川洋充, 宮城英伸, 西田英一, 深野徹, 気柱共鳴現象に及ぼす格子配列円管群内のキャビティの影響, 日本機械学会論文集, 査読有, 76 巻 764 号 B 編, 2010, pp.580-587
- ④ H. Hamakawa, Y. Kouno, E. Nishida, Effect of Fins on Vortex Shedding Noise Generated From a Circular Cylinder in Cross Flow, Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting, 査読有, FEDSM/ICNMM 2010-30290, 2010, pp.1-12
- ⑤ E. Nishida, H. Hamakawa, Azim Arshad, Study on Modeling Method of Vortex Shedding Synchronization in Heat Exchanger Tube Bundles, Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting, 査読有, FEDSM/ICNMM 2010-30917, 2010, pp.1-7
- ⑥ H. Hamakawa, A. Arshad, M. Oota, Effect of Acoustic Resonance Phenomenon on Fluid Flow with Light Dust, Proceedings of the 3rd Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, 査読無, 2010, pp.333-338
- ⑦ H. Hamakawa, T. Moritake, J. Okazaki, T. Nakamura, Vortex Shedding from Trailing Edge of Rotating Blades of Axial Flow Fan, Proceedings of the 3rd Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, 査読無, 2010, pp.104-109
- ⑧ H. Hamakawa, M. Ando, Y. Kouno, Y. Ito, R. Kamo, T. Fukano, E. Nishida, Vortex Shedding from a Fin Tube with Helical Strakes, Proceedings of the 3rd Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, 査読無, 2010, pp.175-180
- ⑨ 濱川洋充, 村岡功一, 西田英一, 深野徹, 密なセレイテッドフィン付き千鳥配列円管群からの渦放出, 日本機械学会論文集, 査読有, 75 巻 755 号 B 編, 2009, pp.1428-1435
- ⑩ H. Hamakawa, H. Miyagi, E. Nishida, Flow Induced Acoustic Resonance in Tube Banks with Cavities, Proceedings of 13th Asia Pacific Vibration Conference, Christchurch, New Zealand, 査読有, Paper No.16, 2009
- ⑪ H. Hamakawa, H. Miyagi, E. Nishida, Effect of Cavities inside Tube Banks on Acoustic Resonance, Proceedings of 9th International of Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 査読無, Paper No. 5D-1, 2009
- ⑫ 濱川洋充, 松江弘人, 左少亮二, 西田英一, 深野徹, ボイラにおける気柱共鳴現象と渦放出に関する研究, 日本機械学会論文集, 査読有, 74 巻 747 号 B 編, 2008, pp.2236-2343
- ⑬ H. Hamakawa, K. Nakashima, T. Kudo, E. Nishida, T. Fukano, Vortex Shedding from A Circular Cylinder with Spiral Fin, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.3, No.6, 2008, pp.787-795
- ⑭ H. Hamakawa, H. Matue, E. Nishida, T. Fukano, Acoustic Resonance and Vortex Shedding from Tube Banks of Boiler Plant, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol.3, No.6, 2008, pp.805-813
- ⑮ H. Hamakawa, H. Mori, M. Iino, M. Hori, M. Yamasaki, T. Setoguchi, Experimental Study of Heating Fluid between Two Concentric Cylinders with Cavities, Journal of Thermal Science, 査読有, Vol.17, No.2, 2008, pp.175-180
- ⑯ H. Hamakawa, K. Nakashima, H. Matsue, Reduction of Noise generated from Small Wind Tunnel, Proceedings of the Second Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, 査読無, Luoyang, China, 2008, pp.122-126

[学会発表] (計 17 件)

- ① 濱川洋充, 河野有児, 西田英一, フィン付き円柱から発生する空力音と後流渦との関係, 流体工学部門講演会講演論文集, No.10-16, 2010 年 10 月 31 日, 山形大学工学部
- ② 濱川洋充, Azim Arshad, 西田英一, 流れ方向に密な格子配列管群からの渦放出と音

- 響共鳴現象に関する研究, 流体工学部門講演会講演論文集, No.10-16, 2010年10月31日, 山形大学工学部
- ③伊藤祐貴, 濱川洋充, 西田英一, フィン付き円柱からの渦放出音に及ぼす螺旋状側板の効果, 徳島講演会講演論文集, No.105-2, 2010年10月16日, 徳島大学工学部
- ④内田圭亮, 濱川洋充, 西田英一, 流れ方向に密な格子配列管群からの渦放出と気柱共鳴現象との関係, 徳島講演会講演論文集, No.105-2, 2010年10月16日, 徳島大学工学部
- ⑤河野有児, 濱川洋充, 西田英一, フィン付き円柱周りの流れ場と空力音との相関計測, Dynamics & Design Conference 2010, A22-266, 2010年9月17日, 同志社大学京田辺キャンパス
- ⑥濱川洋充, 岩槻篤史, Azim Arshad, 西田英一, 気柱共鳴現象と渦放出に及ぼす格子配列管群の管ピッチ比の影響, Dynamics & Design Conference 2010, A22-267, 2010年9月17日, 同志社大学京田辺キャンパス
- ⑦西田英一, 濱川洋充, Azim Arshad, 管群気柱共鳴における渦放出同期化現象のモデリング, Dynamics & Design Conference 2010, A22-268, 2010年9月17日, 同志社大学京田辺キャンパス
- ⑧濱川洋充, 宮城英伸, Azim Arshad, 西田英一, 渦放出に及ぼす格子配列円管群内のキャピティの影響, 第20回環境工学総合シンポジウム 2010 講演論文集, No.10-15, 2010年6月27日, パシフィコ横浜
- ⑨Azim Arshad, 濱川洋充, 西田英一, 気柱共鳴現象発生時の密な格子配列管群からの渦放出に関する研究, 日本機械学会九州支部第63期総会講演会, 2010年3月15日, 熊本大学
- ⑩河野有児, 濱川洋充, 西田英一, フラットフィン付き円柱から発生する渦放出音に関する研究, 日本機械学会九州支部第63期総会講演会, 2010年3月15日, 熊本大学
- ⑪濱川洋充, 若槻篤史, Azim Arshad, 西田英一, 気柱共鳴現象に及ぼす格子配列管群の抗力方向管ピッチ比の影響, 第29回流力騒音シンポジウム, 2009年12月10日, 神戸大学
- ⑫葉真寺敦, 近藤正幸, 濱川洋充, 西田英一, 深野徹, フィン付き円柱から発生する渦放出音に関する研究, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2009年11月8日, 名古屋工業大学
- ⑬濱川洋充, 河野有児, 西田英一, 深野徹, フィン付き円柱から発生する渦放出音に関する研究, 日本機械学会 2009年年度大会, 2009年9月14日, 岩手大学
- ⑭濱川洋充, Azim Arshad, 若槻篤史, 西田英

- 一, 気柱共鳴現象に及ぼす格子配列管群の管ピッチ比の影響, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2009, 2009年8月7日, 北海道大学
- ⑮濱川洋充, 近藤正幸, 西田英一, 深野徹, 直交流中のフィン付き円柱から発生する空力音に関する研究, Dynamics & Design Conference 2008, 2008年9月4日, 慶応義塾大学
- ⑯濱川洋充, 若槻篤史, 末廣聖子, 西田英一, 深野徹, 気柱共鳴現象発生時の管群からの双子渦放出に関する研究, Dynamics & Design Conference 2008, 2008年9月4日, 慶応義塾大学
- ⑰濱川洋充, 葉真寺敦, 西田英一, 深野徹, フィン付き円柱から発生する渦放出音に関する研究, 日本機械学会 2008年度年度大会, 2008年8月4日, 横浜国立大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

濱川 洋充 (HAMAKAWA HIROMITSU)
大分大学・工学部・准教授
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