

## 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 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360399

研究課題名（和文） 炉出力向上のための主蒸気管音響発生メカニズム解明

研究課題名（英文） Study on flow-induced acoustic vibration of main steam pipe for power uprate

研究代表者

岡本 孝司(OKAMOTO KOJI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：80204030

研究成果の概要（和文）：沸騰水型軽水炉における出力向上に伴う主蒸気流量増加による音響共鳴を起因事象とする機器損傷事故を再発させないため、キャビティトーンの発生メカニズムを実験的に評価した。音響発生には流速が重要であり、バッファタンクから 30 秒間のみ実流速条件を作り出した。高速度レーザーと高速度カメラを組み合わせた超高速度 PIV によって速度変動を計測し、流れが音に同期して、振動する様子を定量的に捉えることに成功した。この結果から、キャビティトーンのマカニズムを評価した。

研究成果の概要（英文）：Flow-induced acoustic resonance of cavity had been experimentally investigated in order to prevent the damage of Nuclear Power Plant at the main steam line. The focus of the present investigation is on the clarification of characteristics of cavity flow with high Reynolds number quantitatively and qualitatively. The high-speed flow had been realized using the buffer tank for 30 seconds. The flow fluctuation had been quantitatively clarified using High-speed PIV technique. The mechanism of the acoustic resonance had been investigated using the experimental results.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2011 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2012 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：原子力工学、可視化情報学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：音響練成、高速度計測、原子力工学、振動工学、流体工学

## 1. 研究開始当初の背景

主管と側管からなるキャビティ流れは、工業用配管の分岐部等様々な分野・場所に存在する。このキャビティ流れでは、各管の交差部におけるせん断層の振動と側管内の固有振動の相互作用によって、キャビティトーンと呼ばれる音の振動が励起する。この現象によって、米国の原子力発電所 Quad Cities 2

号機の蒸気乾燥器破損事故等、多くの工学的な問題が発生している。したがって、この現象の解明は流体力学的に重要である。

キャビティ流れに関して、これまでに流体実験や数値解析にて様々な研究がなされており、キャビティ前縁において生じる剥離渦が後縁付近の側壁に衝突することで圧力のフィードバックが発生し、その周波数とキャ

ビティ形状の固有振動数が一致し共鳴することで自励振動が発生することなどが明らかにされている。

しかし、この現象が問題となっている工業機器では、流れ場を特徴付けるレイノルズ数は  $10^6$  のオーダーとされる。既往の実験的研究のうち、共鳴音の音響計測はこれと同等のレイノルズ数でも行われている。一方、流況可視化に関する研究は実験流路のスケールが極めて小規模であり、従ってレイノルズ数も  $10^2 \sim 4$  のオーダーと小さい。実機に近い条件のキャビティ流れにおける音響共鳴現象、特に流体側の振動現象解明が必要である。

## 2. 研究の目的

より実機に近い高レイノルズ数条件のキャビティ流れの特徴を実験的に可視化し、そのメカニズムを評価する事を目的とする。

## 3. 研究の方法

高レイノルズ数の流れ場を再現するための実験装置を図1に示す。実験装置上流に、空気をコンプレッサーでタンク（容量 90 l）に 0.5 MPa まで圧縮・貯蔵し、電磁弁の開放により瞬時に放出することで、各実験流路に大きな流量を送り、高レイノルズ数の流れ場を再現した。また、実験流路の上流および下流に、外部からの音を遮断するサイレンサーを設置した。実験流路にはマイクロフォンおよびデジタル圧力計を設置、流路内に生じる音と圧力をそれぞれ測定した。

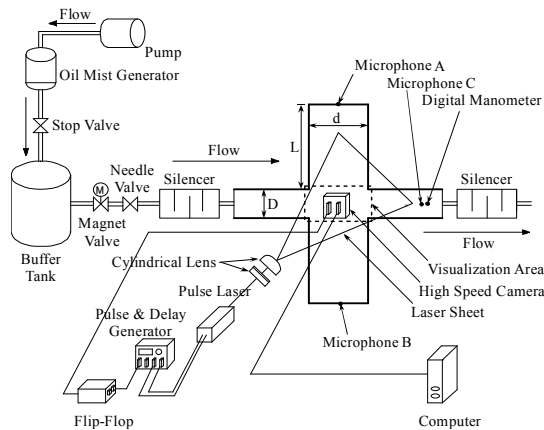


図1：実験装置

流れの可視化には高速度 PIV（Particle Image Velocimetry）による流速計測を採用した。トレーサーには植物油によるオイルミストを用いた。照明にはレーザー光をシート状にして使い、流れ場の撮影にはハイスピードカメラにより 4000 fps にて撮影を行った。これに際して、カメラからの信号周期をフリップ-フロップにより半減し、パルスジェネレーターにより 2 種類の遅れを持たせてレーザーに送ることで、任意の微小時間間隔での

照射・画像撮影を行うフレームストロドリング法を採用した。

Coaxial 型キャビティ実験流路については、透明アクリル樹脂板製矩形管中ほどに同素材の側管を流れ方向垂直同軸上に 2 つ接続、両側管外側端部を閉鎖することで作成した。流路の寸法は同図に示す通りで、各管の内厚は  $w = 8 \text{ mm}$  である。両側管外側の端部にマイクロフォン A および B を、また主管下流にマイクロフォン C を設置し流路内の音響を、同じく主管下流にデジタル圧力計を設置し流路内の圧力を、それぞれ計測した。

Coaxial 型キャビティ流れの共鳴周波数の理論値  $f_{cal}$  は、

$$f_{cal} = \frac{(2m-1)C}{4[L+(D/2)]}, \quad m=1,2,3,\dots \quad (1)$$

## 4. 研究成果

### (1) マイクロフォンによる音響計測

図2に、側管外側端部に設置したマイクロフォン A により測定した流路内に生じる音の強さ（赤線）と卓越している周波数（黒点）の経時変化を示す。T = 0s は、試験流路上流の電磁弁の開放に伴う流路内圧力の上昇開始時点に相当する。T = 0~22s にかけて側管内に音が生じており、一旦収束するが T = 26~29s にかけて再び卓越することが明らかである。発生音の周波数については、T = 0~6s では約 420 Hz が、T = 6~18s および 25~29s では約 80 Hz の周波数が卓越していることが明らかとなった。これらは、式(1)により計算された本流路の共鳴周波数の理論値のうち、それぞれ音響モード  $m = 3$  と  $m = 1$  のもの（図中に青色破線で明示）と概ね一致することから、本流路では電磁弁の開放から空気の流路への流入と流速の低下に伴い、T = 0~6s で  $m = 3$ 、T = 6~18s および T = 26~29s で  $m = 1$  の音響モードでの共鳴が生じると推察される。

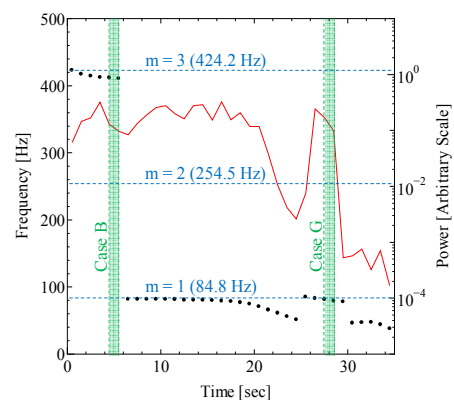


図2：音響共鳴

以上のマイクロフォンによる測定結果から、高速度 PIV により流れを可視化する画像

撮影時点を決定した。T = 1.5s~を Case A, T = 4.5s~を Case B, T = 7.0s~を Case C, T = 10.25s~を Case D, T = 18.5s~を Case E, T = 22.75s~を Case F, T = 27.5s~を Case G, T = 31.5s~を Case H とし、各ケース 1 秒間、主管と側管の交差部付近の流れを可視化した。本稿では Case B (図 2 中に緑で包括) について述べる。

## (2) 高速度 PIV による速度場変動計測

図 3 は Case B における PIV 計測中のマイクロフォン A の計測結果で、音響モード  $m = 3$  の共鳴周波数に近い 411.4 Hz の他に  $m = 1$  に近い 81.8 Hz も卓越している。

PIV によって得た 2000 データの瞬時流速情報を平均化した 1 秒間の平均流速分布である。図中最大ベクトルは 72.6 m/s に相当する。主管と側管で明確な速度差があり、主流が側管の下流側端部から流入、側管内で旋回している。また側管中心 (赤破線) の主管部分の平均主流速は  $U_m = 62.1$  m/s であった。これによりレイノルズ数は  $Re = 1.9 \times 10^5$  となり、高いレイノルズ数が再現できた。

図 4 に瞬時流速分布の一例を示す。図中最大ベクトルは 102.2 m/s に相当である。主流の小刻みな蛇行とそれに伴う渦の生成が両側管側で交互に見られ、これら渦は常時 3 つ存在していた。また、この蛇行運動とは別に主流全体の大規模な揺動が見られ、3 つの渦の内 1 つがより卓越することが観察された。各渦は流下に伴い側管下流側端部に衝突および主流の側管流入が見られた。この流れは側管内を旋回し上流側から反対側の側管へ主流を押しやり、渦の生成を助長していると推察される。これらの運動が周期的に観察された。

Fig. 6 は可視化領域内の L1~3 (Fig. 5 中に明示) における側管方向流速の変動を FFT 解析した結果で、マイクロフォンの計測結果とほぼ等しい傾向である。音響モード  $m = 1$  ( $f_{cal} = 84.8$  Hz) および  $m = 3$  ( $f_{cal} = 84.8$  Hz) での共鳴現象が生じている。

キャビティ流れにおいて、Fig. 5 で確認されたような側管上流側端部から生成される渦の流下・側管下流側への衝突とそれによる上流へのフィードバックの周波数は、

$$f_n = \frac{0.33(n-1/4)V}{d} \quad n=1,2,3,\dots$$

によって計算することができる。ここで、 $n$  は流体力学モード (渦の個数)、 $V$  は自由流速、 $d$  は側管幅である。

Case B における流れについてこの式を適用する。ここで、側管幅は  $d = 0.16$  m を、自由流速  $V$  は平均主流速  $U_m = 62.1$  m/s を用いる。流体力学モード  $n$  については、本流れ場では 3 つの小刻みな渦群 ( $n = 3$ )、および

その中の 1 つが卓越したもの ( $n = 1$ ) が見られたため、これら 2 種類の流体力学モードを計算、それぞれ  $f_n = 352.2$  Hz,  $f_n = 96.1$  Hz となった。これらは音響モードによる共鳴の理論値やマイクロフォンの実測値、PIV によって得た側管方向速度変動の周波数と比較的近いことから、Case B は流体力学モード  $n = 3$  と 1 による渦のフィードバックが、それぞれ音響モード  $m = 3$  と 1 で共鳴している。

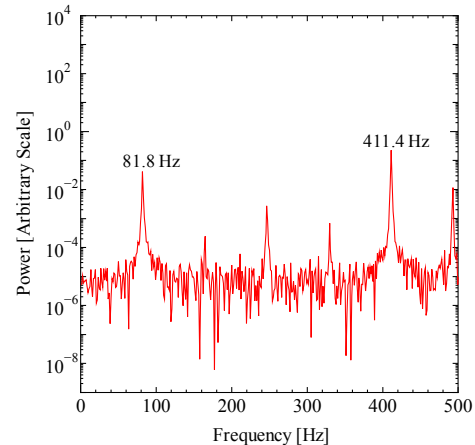


図 3 : 音響振動

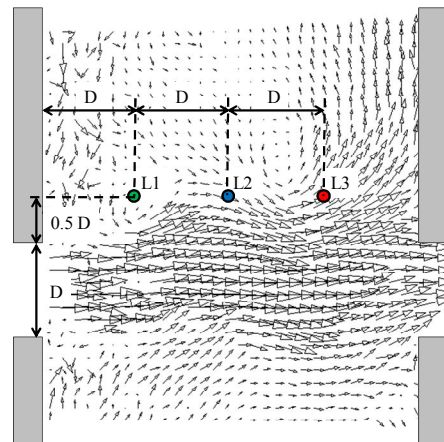


図 4 : 瞬時速度分布

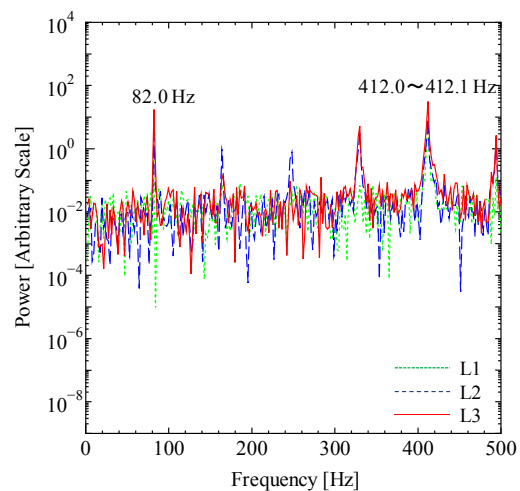


図 5 : 速度変動振動数

### (3) 音響共鳴振動メカニズム

他 6 ケースについても、同様にマイクロフォンによる音響計測および高速度 PIV による流れの可視化によって、音響と流れ場の特性を明らかにした。表 1 に、各ケースの実験結果をまとめる。表中の  $f_{PIV}$  は側管方向流速の変動周波数、 $f_{mic}$  はマイクロフォンの計測結果である。Acoustic Mode  $m$  および Hydrodynamic Mode  $n$  の項は、各ケースで見られた共鳴現象に対応する音響モードと流体力学モードである。流速の異なる 8 ケースの流れ場において、計 5 種類の組み合わせの共鳴が確認された。

これらのより詳細な比較を行うため、図 6 にマイクロフォン A により測定した共鳴音の強さ（赤線）および周波数（黒点）と流速の関係に、各ケースの側管方向流速の変動周波数（緑×印）を重合した図を示す。この図には共鳴周波数の理論値（青破線）と流れのフィードバック周波数の理論値（黒破線）も加えており、理論上はこれらが交差する条件においてキャビティートーンが生じる。

流速が小さい条件（Case E~H）においては、流路内に生じる流れおよび音の周波数はフィードバック周波数の理論値に沿って変化している（Case E~F 付近の傾斜において特に顕著）。これが共鳴周波数の理論値（側管固有振動数）と一致、もしくは近い値となった時に、流路内に強い音響共鳴が生じる（Case E および G）。

一方、流速が大きい条件（Case A~D）においては、流路内に生じる音の周波数は常に共鳴周波数の理論値に近い値をとっており、常時共鳴が生じている。特に Case B や C において、流れ場に見られた流体力学モード  $n = 3$  の本来のフィードバック周波数の理論値と、音響モード  $m = 3$  による共鳴周波数で差があるにもかかわらず、フィードバックの周波数が上昇することでそれらが一致し共鳴している。また、Case B や C においては 2 種類の流体力学モードの流れ場が形成されることにより、2 つの共鳴が生じている。これらにより、流速が速い（すなわちレイノルズ数が高い）と流れ自体が乱れやすくなり、流体力学モードによる流れの周期性に変化が生じやすく、流体の挙動が共鳴に適した状態になりやすいと推察される。

同時に、流速が大きい条件で卓越した音が流路に生じているのは、流体の持つエネルギー自体が大きく、共鳴音に変わるエネルギーも大きいためであると推察される。

これらをまとめると、流速が小さい、すなわちレイノルズ数が小さいと流体力学モードに依存した流れの変動および周期が支配的になり、音響モードと流体力学モードによる共鳴条件が一致しない場合においては共鳴が生じにくい。反対に流速が大きい、すなわちレイノルズ数が高いと流れは乱れやすくなり、流体力学モードに依存した変動およびその周期もフレキシブルとなって、側管の固有振動数にロックインしやすくなる。

表 1 : 実験結果のまとめ

Case	T (sec)	Um (m/s)	Re	$f_{PIV}$ (Hz)	$f_{mic}$ (Hz)	Acoustic Mode $m$	Hydrodynamic Mode $n$
A	1.5-2.5	73.8	$2.4 \times 10^5$	416.0	417.3	3	3
B	4.5-5.5	62.1	$1.9 \times 10^5$	412.1, 82.0	411.4, 81.8	3, 1	3, 1
C	7.0-8.0	54.5	$1.6 \times 10^5$	404.9, 82.0	405.2, 81.9	3, 1	3, 1
D	10.25-11.25	45.2	$1.3 \times 10^5$	82.0	81.8	1	1
E	18.5-19.5	28.7	$7.7 \times 10^4$	76.2	76.1	1	2
F	22.75-23.75	22.1	$5.8 \times 10^4$	58.6	58.6	(No Resonance)	
G	27.5-28.5	14.3	$3.7 \times 10^4$	80.6	80.6	1	3
H	31.5-32.5	9.20	$2.4 \times 10^4$	31.7	42.9	(No Resonance)	

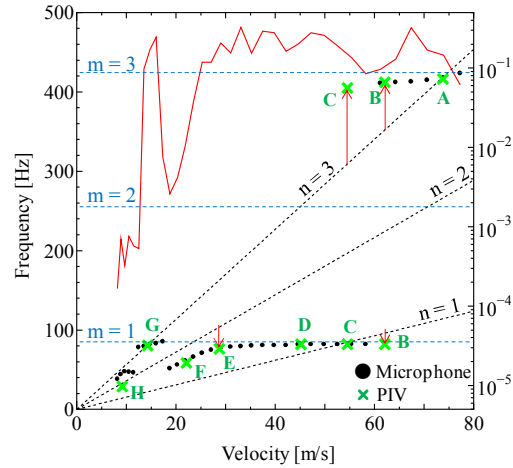


図 6 : 音響共鳴マップ

### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 4 件)

- ① Koji OKAMOTO, High-speed PIV and V&V, The Korea-Japan Joint Seminar on Meas. for Multi-scales & Multi-physics, December 2, 2011, Jeju, Korea (Invited Lecture)
- ② Koji OKAMOTO, Multi-phase flow quantitative visualization for verification and validation, the 7<sup>th</sup> Int. Symp. Measurement Tech. for Multiphase Flows, Sept. 17, 2011, Tianjin, China (Invited Lecture)
- ③ Koji OKAMOTO, High-speed quantitative visualization on the flow-induced vibration, Int. Conf. on Jet, Wakes and Separated Flows, Sept. 29, 2010. (Invited Lecture)
- ④ Koji OKAMOTO, Quantitative high-speed visualization, 14<sup>th</sup> Int. Symp on Flow Visualization, June 23, 2010 Daegu, Korea (Keynote Lecture)

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 孝司 (OKAMOTO KOJI)  
 東京大学・大学院工学系研究科・教授  
 研究者番号：80204030