

# 沸騰水型軽水炉上部プレナムにおける音響共鳴現象の可視化

86700 熊谷 康介  
指導教員 染矢 聡 准教授

In recent years, the power uprate of Boiling Water Reactors have been conducted at several existing power plants as a way to improve plant economy. In one of the power uprated plants (117.8% uprates) in the United States, the steam dryer breakages due to fatigue fracture occurred. It is conceivable that the increased steam flow passing through the branches caused a self-induced vibration with the propagation of sound wave into the steam-dome. The resonance among the structure, flow and the pressure fluctuation resulted in the breakages. To understand the basic mechanism of the resonance, Dynamic Particle Image Velocimetry (PIV) system was applied to investigate acoustic vibration inside the upper plenum. In this study, time-series velocities of the air driven by the acoustic standing wave were obtained in three dimensional space by three high speed cameras. Also, it was succeeded to evaluate the resonance frequency of the upper plenum and three dimensional fluid vibration.

Key words: Boiling Water Reactor, Acoustic vibration, Dynamic PIV

## 1 緒言

沸騰水型軽水炉(BWR)を利用した原子力発電所の経済性の改善のために、複数の発電所において出力向上が行われているが、同時にさまざまな事象が報告されている。

本研究では、特に米国の Quad Cities 原子力発電所において、BWR 上部プレナムの蒸気乾燥器が破損した事象に着目する。この事象は流体関連振動現象に起因すると考えられており、主蒸気管に設置されている安全弁などの分岐管で発生した音響波が、上部プレナム内で共鳴し、圧力波として上部プレナム内の構造部材を振動させ、その結果高サイクル疲労によって亀裂が生じたものとされている。

BWR の蒸気乾燥器の破損メカニズムを解明するためには、上部プレナムにおける共鳴周波数において、音響場が3次元のどのようなモードで振動するかを明らかにする必要があるが、これまでの研究では、高周波の音響場を3次元的に測定することが困難であった。本研究では高速度 PIV システム及びマイクロフォンを利用することにより3次元可視化計測を行う。本報告では、上部プレナムの共鳴周波数を調べた上で、蒸気乾燥器の有無による音響場の差異の把握及び高速度カメラ3台を用いた音響共鳴場の3次元可視化の結果について述べる。

## 2 実験装置

主蒸気管内で発生した音響波は、主蒸気管を伝播し原子炉の上部プレナムに至る。上部プレナム内には蒸気乾燥器が設置されるなど、複雑な3次元構造をしている。そこで、Fig.1 に示すように、上部プレナム、4本の主蒸気管を模擬した構造物から構成される実験装置を製作した。ただし、蒸気乾燥器の有無については、実験パラメータの1つとした。上部プレナムは、直径500mmとし、実機の1/10のスケールモデルである。また、上部プレナムに供給される音響波は、主蒸気管下流の蒸気逃し弁の枝管や、蒸気ヘッドにおいて発生し、この音響波が主蒸気管を伝播して上部プレナム内に達すると考えられている。本報告では、音響波を再現するために、最大2カ所のスピーカーをそれぞれの主蒸気管の下流部に設置した。

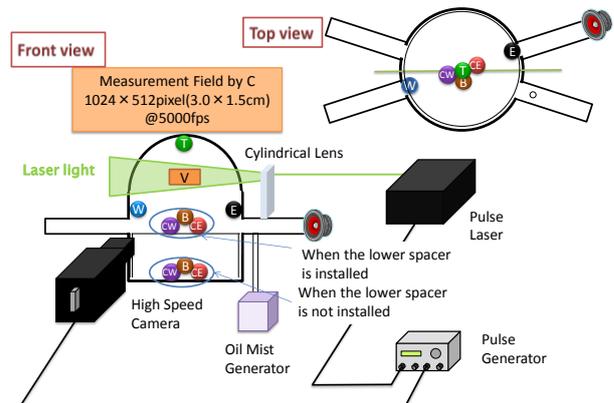


Fig.1 Apparatus with six microphones and PIV system

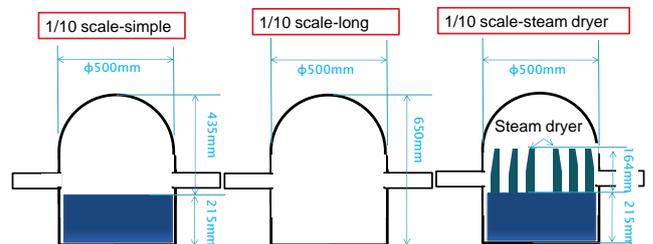


Fig.2 Three patterns at upper plenum

## 3 周波数スイープテスト

### 3.1 実験条件

上部プレナムの共鳴振動数のみならず、共鳴周波数においてどの方向の振動モードになるかについても重ねて調査した。また、上部プレナムについては Fig.2 に示すように、蒸気乾燥器下部台の有無及び蒸気乾燥器の有無により、計3パターンを考慮した。

Fig.1 に 1/10scale-simple 及び 1/10scale-long におけるマイクロフォンの設置場所を示す。マイクロフォンはスピーカー軸方向の East, West, Center-East, Center-West, Top, Bottom の計6箇所を設置することで、上部プレナムにおける圧力変動の多点計測を可能とした。Center-East, Center-West, Bottom の設置箇所については蒸気乾燥器下部台の有無により、設置箇所を変えた。なお、実験では、共鳴周波数を調査する際には、上部プレナムに手を触れながら、周波数の違いによるドームの共振を体感した。特に、

大きな共振を感じた周波数前後において、1Hz ごとにスピーカークの周波数をスイープさせて、マイクロフォンで音圧変動を測定した。共鳴周波数を特定した後、定在波による気体の振動を、高速度カメラを用いた PIV システム及びマイクロフォンを用いて計測を行った。

### 3.2 実験結果及び考察(1/10 scale-simple の場合)

1/10 scale-simple の場合についての周波数スイープテストを行った結果について示す。本報告では、上部プレナムにおいて水平方向の振動が生じる場合を考慮し、マイクロフォン East 及び West の出力振幅に着目し、共鳴周波数の特定を行う。その後、PIV 実験を行うことで、振動モードの方向を調査することとした。

Fig.3 に、特に、共鳴を感じたスピーカー周波数 455Hz-469Hz までの周波数ピークパワー値を示す。この図より West 及び East のいずれにおいても、462Hz 周辺において周波数のピークが見られる。また、その約 1/3 の周波数の範囲内の 150Hz-158Hz では、154Hz の周波数のピークの把握ができた。

Fig.4 左側にスピーカー周波数が 462Hz の場合の各マイクロフォンの出力振幅の時系列データを示す。この図より、East 及び West の出力振幅が卓越し、また、両者の位相差が 180 度程度であることから、水平方向の振動モードが確認できたことから、水平方向の振動が発生していると推測される。Fig.4 右側に、PIV 計測場での速度リサーチの結果を示す。この図からも水平方向速度成分が卓越していることから、スピーカー周波数が 462Hz の場合においては、音響振動が East-West 間に水平方向に音響振動が発生していると考えられる。

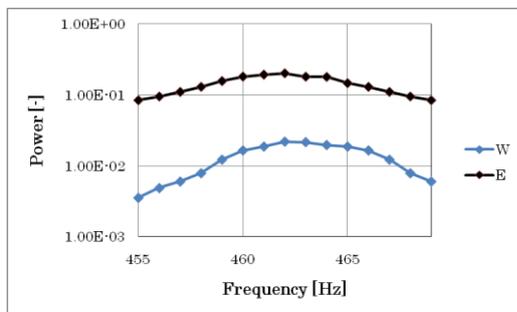


Fig.3 Frequency peak power value

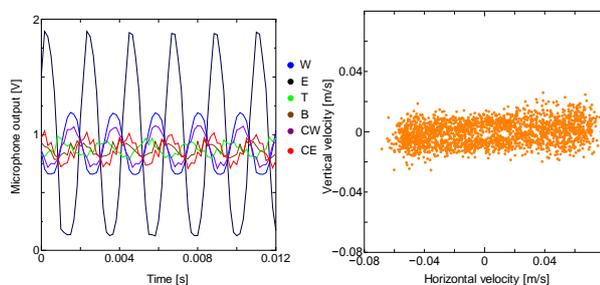


Fig.4 Time-line data by microphone and Velocity lissajous by PIV

### 3.3 上部プレナムの3形状パターンでの共鳴周波数の比較

1/10 scale-long, 1/10 scale-steam dryer の形状の場合

も同様の方法により、共鳴周波数を求めた。その結果、1/10 scale-long では 427Hz 及び 142Hz の周波数において、また、1/10 scale-steam dryer では 462Hz, 154Hz の周波数において周波数のピークが見られた。

Table.1 より 1/10 scale-simple は、それぞれ 462Hz 及び 154Hz でピークが見られたので、1/10 scale-long は 1/10 scale-simple 場合と比べて、共鳴周波数がそれぞれ 7.6%, 7.8%低いことがわかる。これは、蒸気乾燥器下部台をはずすことにより、共鳴空間が大きくなったことによるものと考えられる。また、1/10 scale-simple と 1/10 scale-long の共鳴周波数に変化は見られなかった。これは、蒸気乾燥器はメッシュ構造であり、共鳴空間の体積の変化が両者において変化がないからと考えられる。これらより、蒸気乾燥器の有無は共鳴周波数において関係ないことがわかる。よって、1/10 scale-simple での音響場を3次元的に計測したいが、下部台があることにより、蒸気乾燥器下部からの高速度カメラ計測が困難であるので、共鳴周波数において類似性のある、1/10 scale-simple と 1/10 scale-long の 427Hz の音響モードについて詳細に調査する。

Table.1 Resonance frequency at three patterns

	Resonance frequency
1/10 scale-simple	462Hz, 154Hz
1/10 scale-long	427Hz, 142Hz
1/10 scale-steam dryer	462Hz, 154Hz

## 4 音響共鳴場の3次元可視化

### 4.1 実験装置

Fig.5 に示すように、上部プレナムにおける音響共鳴現象を3次元的に把握するために、6つのマイクロフォン及び3台の高速度カメラからなる高速度 PIV システムを整備した。カメラについては、上部プレナム下部から Left, Right の2台、上部プレナム正面から Center の1台、計3台整備した。また、パルス・ジェネレータにより3台の高速度カメラ、マイクロフォン及びパルスレーザーを同期させた。この同期により各サンプリングポイントにおける位相差の定量的な把握を可能とした。

座標軸は、West-East 軸を X 軸 (horizontal axis), North-South 軸を Y 軸 (longitudinal axis), Top-Bottom 軸を Z 軸 (Vertical axis) と定義する。

### 4.2 427Hz における共鳴音響場

本実験では、スピーカー S\_E1 のみにファンクションジェネレータにより、共鳴周波数 427Hz の入力信号を与えた。Fig.6 に、Center, Left, Right それぞれの計測場中央でサンプリングした速度リサーチを示す。X-Z 断面の速度リサーチを示す Center においては、X 軸方向のみの振動が見られる。また、X-Y 断面の速度リサーチを示す Left 及び Right では、スピーカー軸方向の音響波による直線振動が見られる。以上より、X-Y 断面において音響波

による直線振動が発生していると推測される。

次に、マイクロフォン間での位相差の把握を行う。Fig.6に各マイクロフォンの出力振幅を示す。East 及び West の出力振幅が Top, Bottom, North, South と比べて卓越している。また、East-West の位相差が  $180^\circ$  程度であることから、PIV の速度リサーチ及びマイクロフォンの位相差解析より、スピーカー軸での直線振動が発生していると推測される。

4.3 スピーカー配置が S\_E1・S\_E2 の場合の音響共鳴場

Fig.6 において、スピーカー S\_E1 及び S\_E2 において、427Hz の入力信号を与えた。位相については、S\_E1 は固定し、S\_E2 の位相を S\_E1 に対し、0deg から 180deg まで 45deg ずつ計 5 パターン変化させた。その結果を Table.2 に示す。本報告では位相差が 135deg, 180deg の場合を考察する。

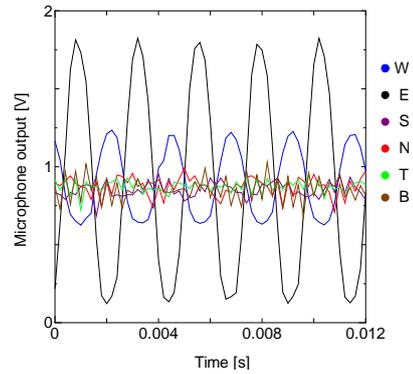


Fig.6 Time line data of microphones (Frequency of the speaker : 427Hz)

Table.2 Relationship between phase difference vibration direction and type

Phase difference	Vibration direction	Vibration type
0 deg	X axis direction	rectilinear vibration
45 deg	X-Y cross section	rotation vibration
90 deg	X-Y cross section	rotation vibration
135 deg	X-Y cross section	rotation vibration
180 deg	Y axis direction	rectilinear vibration

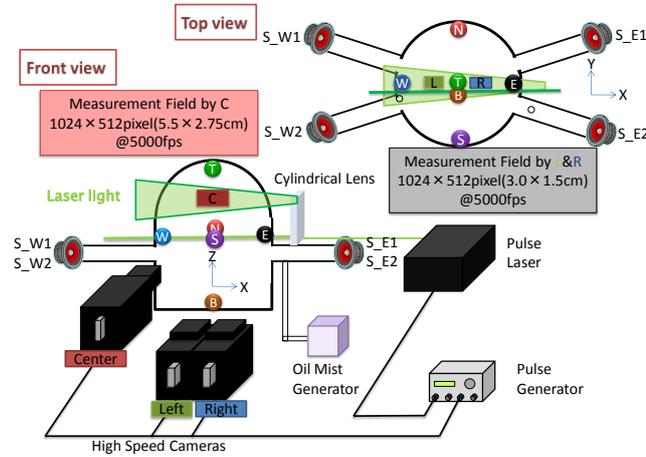


Fig.5 Experimental apparatus with three cameras

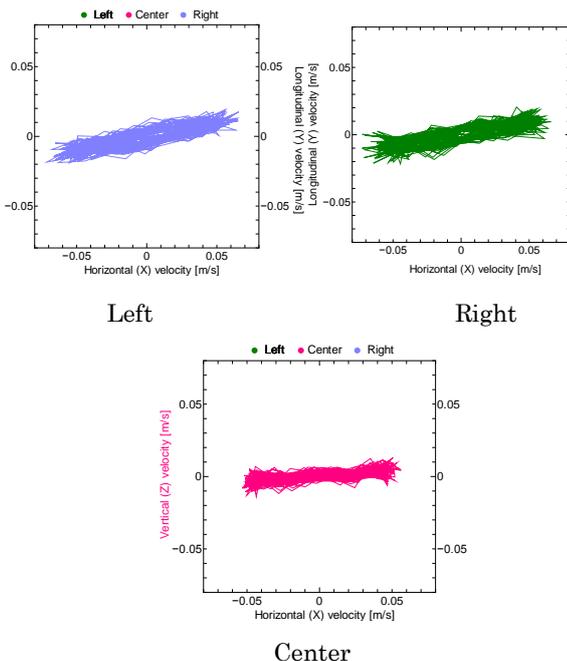


Fig.6 Velocity lissajous (Frequency of the speaker : 427Hz)

4.3.1 スピーカー間の位相差が 135deg の場合

Fig.8 に PIV 計測場 Left, Center, Right の速度リサーチを示す。X-Z 断面の速度リサーチを示す Center では、X 軸方向のみの振動が見られる。また、X-Y 断面の速度リサーチを示す Left 及び Right では、音響波による回転振動がおきている。また、Right での速度リサーチより、X 軸速度成分と Y 軸速度成分の位相差が 90deg 程度であることがわかる。以上より、X-Y 断面においてによる回振動が発生していると推測される。

Fig.9 に、X-Y 断面に位置する各マイクロフォンの時系列データを示す。また、Table.3 に各サンプリングポイント間の位相差を示す。East-North, North-West, West-South, South-East 間の位相差に着目すると、それぞれ 90deg 前後である。これは、X-Y 断面において、East-North-West-South-East の順番で反時計回りに、円を描くように音響波が伝播していることを示す。以上より、スピーカー位相差が 135deg の場合の X-Y 断面において音響波による反時計回りの回転振動が発生していると考えられる。

PIV 計測場での位相差を確認する。Right において  $V_x - V_y$  の位相差:  $92^\circ$ , Left において  $V_x - V_y$  の位相差:  $31^\circ$  である。以上より、Right 及び Left において回転振動が生じることがわかる。また、Right-Left 間の  $V_x$  の位相差:  $169^\circ$  であることから、Right-Left 間において X 軸方向の振動が発生していることがわかる。以上より、PIV 計測場間同士の比較から局所的な評価はできるが、音響場全体の詳細については、現在検討中である。

4.3.1 スピーカー間の位相差が 180deg の場合

Fig.10 に、PIV 計測場 Left, Center, Right の速度リサーチを示す。X-Y 断面の速度リサーチを示す Left 及び Right では、直線振動がおきている。以上より、PIV

計測場の X-Y 断面において音響波による直線振動が発生していると推測される。

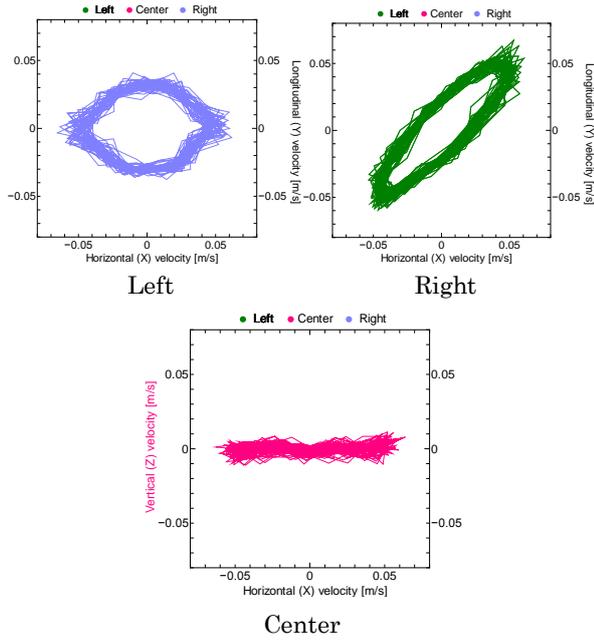


Fig.8 Velocity lissajous  
(Phase difference between S\_E1 and S\_E2 : 135deg)

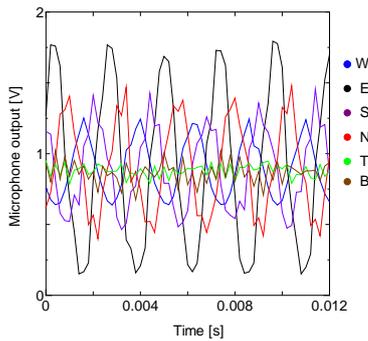


Fig.9 Time line data of microphones  
(Phase difference between S\_E1 and S\_E2 : 135deg)

Tab.3 phase difference between each sampling point

E [deg]	N [deg]	W [deg]	S [deg]	C [deg]
0	89	184	277	92

Fig.11 左側に、スピーカー位相差が 180deg の場合のマイクロフォンの時系列データを示す。Y 軸方向に位置する North と South の振幅が West, South よりも卓越していることがわかる。ここで、North と South の位相差に着目すると、North-South 間の位相差が 180°程度である。よって、X-Y 断面において、Y 軸方向の振動が成立していると考えられる。

Fig.11 右側の時系列データより、PIV 計測場間の位相差の把握を行う。特に、速度リサーチ及びマイクロフォン間の位相差の把握より、Y 軸方向に卓越した振動が見られたことから、PIV 計測場 left 及び Right における Y 軸方向速度成分に着目する。この図より、Left 及び Right の Y 軸方向成分の位相差に着目すると、180°程度であることがわかる。よって、X-Y 断面において、Y 軸方向の振

動が成立していると考えられる。

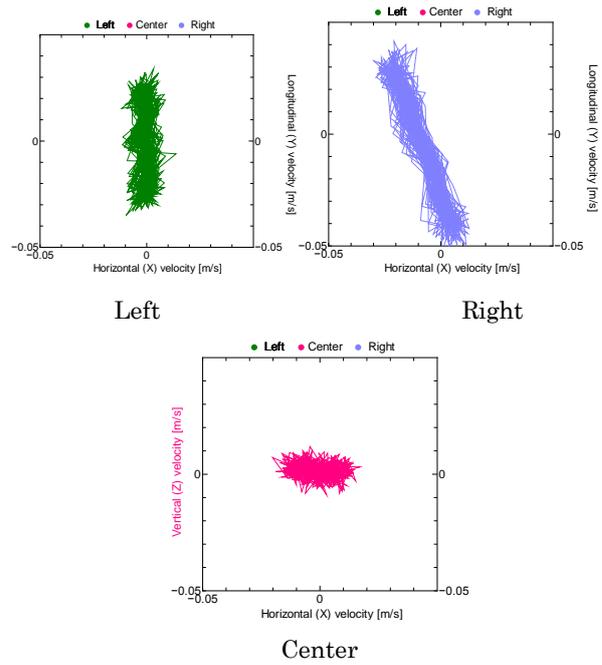


Fig.10 Velocity lissajous  
(Phase difference between S\_E1 and S\_E2 : 180deg)

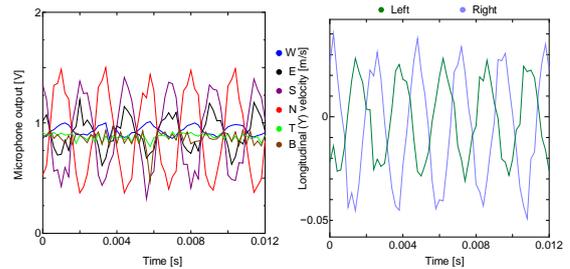


Fig.11 Time line data of microphones and PIV  
(Phase difference between S\_E1 and S\_E2 : 180deg)

### 5 結論

本研究では、沸騰水型軽水炉上部プレナム模擬実験装置を製作し、音響波計測のために、高速度 PIV システム及びマイクロフォンを利用した。この実験装置で、スピーカーの周波数をスイープさせて、マイクロフォンで音圧変動を測定することで、上部プレナムの共鳴周波数を特定した。また、音響場の 3 次元定量可視化計測を行い、共鳴周波数 427Hz での 3 つ振動モードを特定した。今後、シミュレーションとの整合性を取ることで、実機の音響共鳴現象の解明に繋がれると考える

### 6 参考文献

- 1) US Nuclear Regulatory Commission: NRC Information Notice 2002-26 Supplement 1, (2003).
- 2) Y. Moigne, *et al.*: Nuclear Engineering and Design, 238(12), 2106-2114. (2008)
- 3) G. DeBoo, *et al.*: Proc. of 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, 1-7. (2007).