

数値解析によるBWR上部プレナム内における音響共鳴現象評価

47086718 平川裕雅

指導教員 岡本孝司 教授

In recent years, the power uprate of Boiling Water Reactors have been conducted at several power plants, but many problem has reported. Particularly, Quad Cities Unit 2 steam dryer experiences high cycle fatigue due to an acoustic-induced vibration in case of the power uprate. It is conceivable that at the increased steam flow passing, resonances among a structure, a flow and a pressure fluctuation, resulting in the breakages. To understand the basic mechanism of the resonance, previous researches were done by FEM or point measurement, while it was difficult to understand acoustic resonance in details. This study aims to understand mechanism of acoustic resonance in BWR with numerical simulation, and to compare the result with the PIV experiment data.

Key words : BWR, acoustic analysis, Steam Dryer, Flow-Induced Acoustic Resonance

1 緒言

沸騰水型軽水炉(BWR)では、出力向上が行われているものがあるが、同時にさまざまな問題点も指摘されている。中でも特筆すべきは、米国のQuad Cities 2号機の拡張型出力向上時において、蒸気乾燥器に音響波による高サイクル疲労が見られた現象である。これは、主蒸気配管に接続されている安全弁からキャピティーン¹⁾と呼ばれる音響波(圧力脈動)が発生、主蒸気管を経て原子炉内部に伝わり、蒸気乾燥器を振動させ、その結果として蒸気乾燥器に疲労破壊が起こったと考えられている。

今後のBWR出力向上を見据え、BWRの蒸気乾燥器の破損メカニズムを解明するためにも、BWR内部の音響共鳴を明らかにする必要がある。過去の研究ではBWR内部の音響シミュレーションや蒸気乾燥器の圧力測定が行われているが、BWR内部の詳細な音響共鳴は明らかにされていない^{2), 3)}。

そこで本研究では、BWRの蒸気乾燥器破損メカニズムを明らかにするため、BWR内部の音響計算を行う。典型的なBWRの1/10モデルを使った実験結果と、BWRの1/10モデルでの計算結果、1/1モデルでの計算結果を比較することにより、BWR内部の音響共鳴を明らかにする。

2 音響ドームの特性把握

2.1 シミュレーションの概要

安全弁から発生した音響波は主蒸気管を経て原子炉内部に至る。音響波の発生から、原子炉内部の三次元的な音響共鳴に至る全てのプロセスを計算するのは計算コストが多いためである。そこで今回はBWR内部の高圧蒸気の流れを無視し、特定の周波数の音が発生するという前提のもと、主蒸気管の原子炉近くに音源を置き、炉内での音響共鳴を有限要素法で計算した。計算コードは商用コードANSYS v11sp1を用いた。

2.2 物性値の検討

今回の計算では、「気体の物性値を持った固体」に圧力変動を付与することで音響伝搬を模擬する。そのためには有限要素法の計算に必要な物性値を求める必要がある。そこで気体の物性値である音速 c 、体積弾性率 K 、密度 ρ から、気体と固体の関係式を用いて、固体の物性値であるヤング率 E 、ポアソン比 γ を求めた。

今回用いたパラメータを Table.1 に示す。

Table.1 Material characteristics

	25° 空気	287° 飽和水蒸気
音速	340 [m/s]	490.5 [m/s]
体積弾性率 K	$1.4 \cdot 10^5$ [Pa]	$8.94 \cdot 10^6$ [Pa]
ヤング率 E	$1.4 \cdot 10^5$ [Pa]	$8.94 \cdot 10^6$ [Pa]
ポアソン比 γ	0.333	0.333
密度 ρ	1.203 [kg/m ³]	37.134 [kg/m ³]

2.3 実験との比較計算

BWR の上部プレナムを模擬した 2 つの形状について、計算と実験⁴⁾によって音響モードを調べた。ここで、2 つの形状を "1/10model-simple"、"1/10model-simple long"と呼ぶことにする。蒸気乾燥器下部の台があるときと無いときの 2 つの形状についてそれぞれ、計算ではモーダル解析により固有モードと固有振動数を把握し、周波数応答解析で主蒸気管の 1 カ所に音響振幅を与えたときのドーム内のスリーブ曲線を取得した。このとき、計算ではメッシュサイズを 34mm 以下に設定し、600Hz まで解析を行った。実験では主蒸気管 1 カ所に圧力振幅を与え、ドーム内の音圧の変化を調べると共に、音圧が強い周波数において PIV でドーム中央部の空気の変動を調べた。周波数応答曲線及びモード図の変位、圧力分布(音圧相当)からモードの特定をした。

2.4 計算結果及び実験結果と考察

計算からは両端を固定端とする U 字管での共鳴に近い現象の時に強く共鳴すること、両端を自由端とする U 字の棒が横波となって振動するイメージの現象の時に強く共鳴することが示唆され、これらに一致する実験の固有モードが存在した。この時の基本モードの概念図を Fig.2 に示す。ここで、"1/10model-simple"において計算による 187Hz の固有モード図を Fig.3 に、実験による 154Hz の実験によるドーム内の音圧とドーム中央部のリサージュ曲線を Fig.4 に示す。この時、周波数応答解析では 187Hz 時にドーム中央部が z 方向

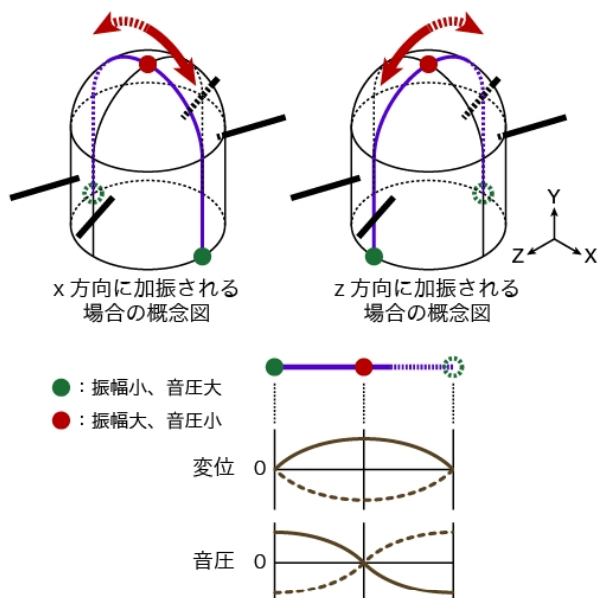


Fig.2 Image of acoustic resonance mode

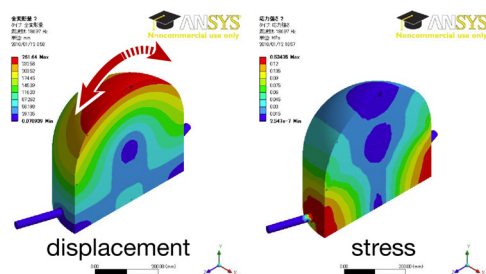


Fig.3 Contor plot of acoustic eigenmode at "1/10model-simple" (cross section, 187Hz) left : displacement, right : stress

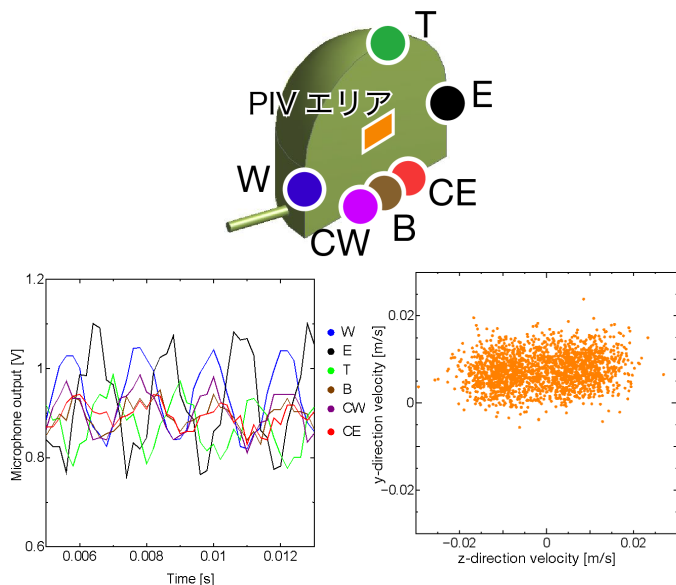


Fig.4 Experimental data (154Hz) left : amplitude of microphone at 7points in dome top : layout of PIV area and microphone right : lissajous curve at center of dome

に振動する強いピークが見られ、実験の PIV 解析のリサージュ曲線で z 方向に振動していることからドーム中央部での挙動が定性的に一致している。また、モード

ル解析から 187Hz 時モードの応力分布と、実験でスピーカーで調べた 154Hz 時の音響振幅が W、E で特に大きな値をとるという点から定性的に一致していると言える。以上のことから、実験における 154Hz は計算における 187Hz と示唆される。

同様の手法で"1/10model-simple"においては、実験で発見した 154Hz、162Hz、462Hz、486Hz は計算で求めた 187Hz、193Hz、429Hz、454Hz のモードにそれぞれ対応する事が示唆された。"1/10model-simple long"でも同様に計算と実験で対応するモードが存在することが示唆された。

従って、実験と計算は定性的に一致していることが示唆された。

3 実機条件での音響モード

3.1 シミュレーションの概要

寸法は"1/10model"と"1/1model"、形状は 2 節で使用した"simple"と"simple long"、蒸気乾燥器部分をくりぬいてモデリングしている"steamdryer"の 3 形状 (Fig.5)の計 6 条件において、モーダル解析と周波数応答曲線を行った。"1/1model"の 3 形状を Fig5 に示す。これにより、寸法と形状の影響を検討し、実機での音響共鳴モードの予測を行う。1/10 モデルはメッシュサイズが 34mm 以下に設定し、600Hz まで解析を行った。1/1 モデルは 340mm 以下に設定し、87Hz まで解析を行った。

3.2 計算結果

BWR の上部プレナム内を模擬した 1/10 モデル及び 1/1 モデルに、音圧を与える箇所と位相差を変え、計算を行った。その結果、蒸気乾燥器部分をくりぬいてモデリングしている"steamdryer"では、独自のモードが出るのがわかった。また、共通して見られるモードでは、蒸気ドームの体積による影響が見られたが、固有振動数に与える影響は大小様々だった。例えば、ドーム上部が z 方向に振動するモードでは、

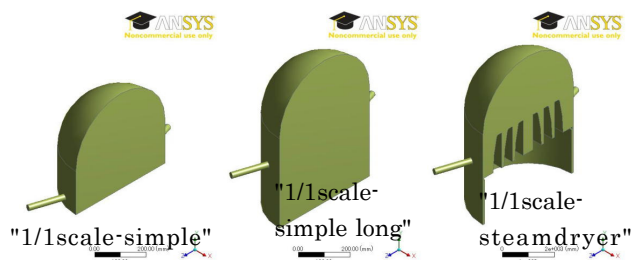


Fig.5 Geometry of 3models (1/1scale, cross section)

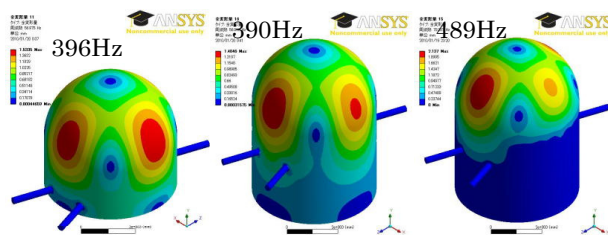


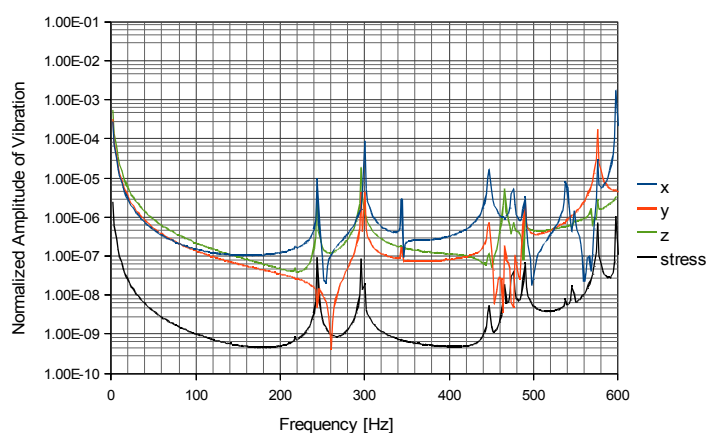
Fig.6 Contor plot of acoustic eigenmode at same mode (y-direction vibration)

"1/10model-simple"、"1/10model-simple long"、"1/10model-steamdryer"の固有振動数はそれぞれ187Hz、170Hz、296Hzであったのに対し、ドーム円筒面上部の一部がy軸方向に振動するモードでは固有振動数がそれぞれ396Hz、390Hz、489Hz(Fig.6)であった。特に、計算モデルで円筒面の長さによる影響が効いてくると考えられるモードでは形状によって固有振動数が大きく異なったが、上部半球の影響が支配的で、円筒面の影響が弱いと考えられるモードでは固有振動数の影響があまり見られなかった。

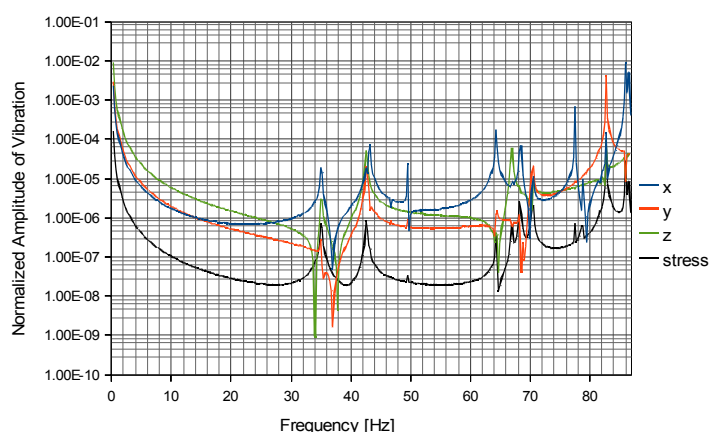
3.3 計算結果の考察

空気と高圧蒸気の音速の差とモデルサイズの影響により、1/10モデル(空気)は1/1モデル(高圧蒸気)より固有振動数が6.95倍程度大きかった。空気(音速340[m/s])を媒質とする1/10scaleの管と、高圧蒸気(音速490.5[m/s])を媒質とする1/1scaleの管において、同一のモードで共鳴する固有振動数の比が理論値では6.93倍で計算結果に非常に近いことから、"1/10model"は実機の1/6.95スケールモデルに相当すると言える。また、音響モードのモード図、モード形状はほぼ一致した。さらに、スイープ曲線では、ピーク値の周りで値の落ち込みがモデルサイズによって異なる箇所があることがわかった。ここでは"1/10model-steamdryer"及び"1/1model-steamdryer"の周波数応答曲線をFig.7に示す。

周波数応答解析の結果より、主蒸気管1箇所のみに



(a) "1/10-steamdryer"



(b) "1/1-steamdryer"

Fig.7 Frequency response curve in Steam Dome

圧力変動を加えた条件に比べ、主蒸気管4カ所全てに圧力振幅を与え、かつz軸対象に180°の位相差に設定したときはドーム中央部はz軸方向に振動しやすいことがわかった。これは、x軸方向の成分は両側から来る同位相の圧力波が足し合わされることで振動が打ち消され、z方向成分は両側から来る逆位相の圧力波が足し合わされることで振動が強め合ったからと考えられる。また、共鳴空間の体積が大きいほど同じモードでも固有振動数が高くなることと、蒸気乾燥器部分をくりぬいたモデルでは独自もモードが出ることから、同じ縮尺のモデル3つで比較すると、ピーク数は少ない順に"simple"、"simple long"、"steamdryer"となった。

4 連成解析

4.1 シミュレーションの概要

Quad Cities発電所の蒸気乾燥器破損事故は音響共鳴によって蒸気乾燥器が加振され破損したと考えられている。蒸気乾燥器は非常に複雑な形状をしており、実機で破損した箇所をモデル化することは困難である。音響共鳴と構造物の振動の関係を調べるために、ここでは蒸気乾燥器全体を1つの構造物と見なし、ドーム内の音響と双方向の連成解析を行い、相互作用を評価する。事前に1/1スケールの蒸気乾燥器(以下、構造物と呼ぶ)単体でのモーダル解析を行い、固有振動数を求めた。次に、構造物と蒸気ドームの連成解析を行った。構造物のヤング率を変更し、固有振動数を変化させた。

4.2 計算結果

構造物の振動数が下がるほど構造物と蒸気ドームが連成するモードの固有振動数が下がった。

構造物のヤング率が 1×10^4 [Pa]の時、構造物単体の固有振動数が27Hzなのに対し、蒸気ドームと構造物が連成し共に振動する最低次モードの固有振動数が29Hzだった。この時のモードをFig.8に示す。ドーム上部の振動方向と構造物が逆位相に振動している。また、この時のドーム中央部の周波数応答曲線と構造物プレート端部の周波数応答曲線をFig.9に示す。構造物と蒸気ドームが同じ周波数で振動している。ちなみに、3で行った1/1-steamdryer"のモデルでは蒸気ドームが今回の29Hzと同様に振動するモードが43Hzであったことから、蒸気ドームの固有モードが構造物の固有振動数に引き込まれていると考えられる。さらに、蒸気ドームと構造物が共に振動するモードが複数見つかった。

4.3 連成解析の考察

構造物の振動数によって、構造物が振動するモードと同じ方向に気体が振動する気体のモードが引き込まれた。結果として構造物の固有振動数に近い振動数で構造物が振動し、周囲の気体は気体単体での固有振動数より明らかに低い振動数で構造物と連成して振動するモードが見られた。つまり、構造物をモデリングしない3の計算(構造物を剛とした場合)(Fig.7(b))に比べ、連成解析を行ったほう(Fig.9(a))がより多くのピークが立っていると共により低い周波数でピークが見られる。

ただし、周波数応答解析の結果から、連成解析で構造材と蒸気ドームが共に振動する固有振動数から少しずれた周波数では構造材の振動が抑えられている(Fig9. (b))。1/10 の実験装置内に音叉を設置し、スピーカーからの音圧で加振した実験⁴⁾では、音叉の固有振動数の周波数では音叉が大きく振動したが、すこしずれた周波数ではあまり振動しないことがわかっている。

これらのことから、構造材自体の固有振動数に非常に近い振動数で構造材と蒸気ドームが連成し、共に振動したモードが存在すると考えられる。つまり、ほとんどの周波数帯では構造材はほとんど振動しないものの、特定の周波数の音響波が蒸気ドーム内で共鳴する

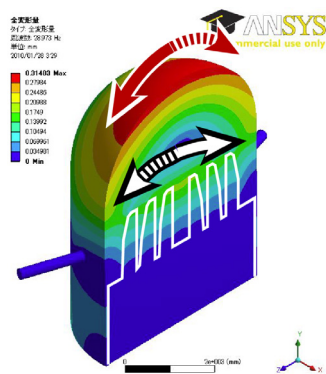
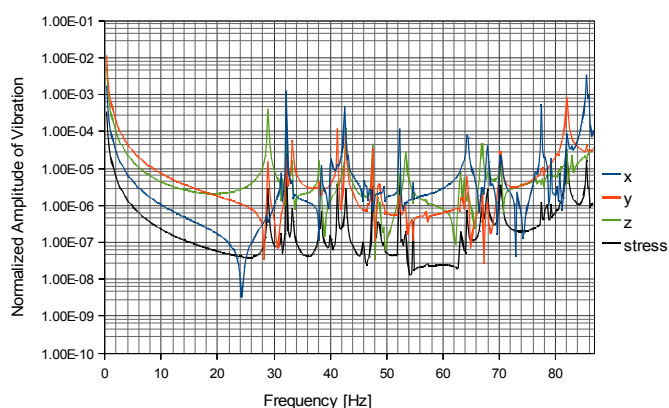
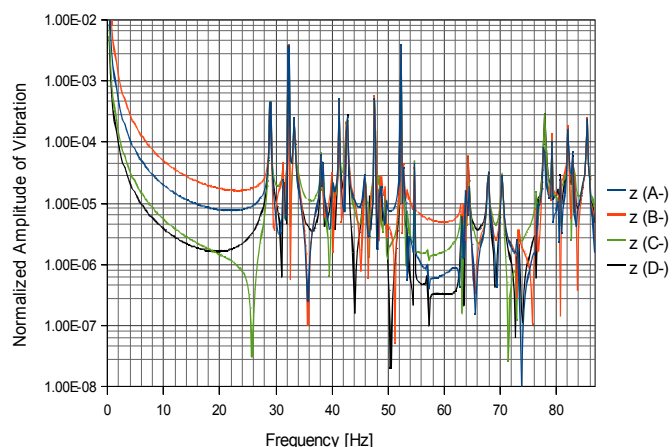


Fig.8 Contor plot of acoustic eigenmode (displacement, 2way coupling analysis)



(a) steam : center of steam dome



(b) structure : edge of steamdryer

Fig.9 Frequency response curve in Steam Dome

と、構造材と蒸気ドームが連成して大きく振動すると言える。従って、今回の解析対象であった国内の標準的な BWR に限らず、Quad Cities の蒸気乾燥器破損事故でも、同様のメカニズムで破損が起きたと推測される。なお、今回は蒸気ドームに対して十分大きな構造材を想定したが、実際は小さな部位で振動が発生した。スケール効果については今後検討を行う必要がある。連成振動が起きる時は構造材の振動数にドームの固有モードが引き込まれるため、ドーム内の音響共鳴現象は構造材の固有振動数が強い影響を与える。そこで、キャビティトーンの周波数から構造材の固有振動数をずらしておくことが非常に重要である。

5 まとめ

BWR 内部の音響共鳴空間を模擬した 1/10 モデルでの計算結果と実験の結果を比較することで Verification を行った。次に、1/1 モデルを作成し、実機条件での音響共鳴の予測を行った。最後に、音響共鳴と構造物の振動の相互作用を調べるために蒸気乾燥器を 1 つの構造材と見立て、蒸気部分との双方向の連成解析を行った。

- 1)ドームの固有モードと周波数応答曲線を計算し、実験結果と比較した。結果、計算と実験が定性的に一致していることを確認した。
- 2)モデルサイズと形状の影響を調べ、1/1 スケールで実機の音響解析を行った。結果、実機での音響共鳴モードを予測することができた
- 3)蒸気乾燥器と蒸気部分を連成し、上部プレナム内の音響共鳴現象を評価した。結果、双方向の連成条件下では構造材の固有振動数に強く支配され、蒸気ドームの固有振動数が大きく下がることがわかった。

今後は主蒸気流の乱れも考慮した音響解析を進めると共に、蒸気乾燥器をより現実に近いモデリングを行い、さらに詳細に蒸気乾燥器の疲労破壊が起こるメカニズムを明らかにする必要がある。また、逃がし安全弁で発生する音響波の発生と上部プレナム内での音響共鳴現象を同時に検討し、これらの相互作用を明らかにする必要がある。

6 参考文献

- (1)S.Ziada and S.Shine, Journal of Fluids and Structures Vol.13, 127-142 (1999)
- (2)Yasumi Kitajima, et al., Proc. ICAPP '06 Paper 6358 (2006)
- (3)高橋志郎、他6名、日本保全学会第6回学術講演会要旨集、525-530 (2009)
- (4)熊谷康介、東京大学修士論文 (2010)