

ほぼ密閉された流体領域に着目した 円筒シェル構造物の流体連成振動解析

FLUID-COUPLED VIBRATION OF THIN SHELL STRUCTURES DUE TO VERTICAL EXCITATION

豊田幸宏*、増子芳夫*、萩原豊*、栗原千鶴子*、河村豊**

by Yukihiro TOYODA, Yoshio MASUKO, Yutaka HAGIWARA, Chizuko KURIHARA and Yutaka KAWAMURA

LMFBR's primary systems have a several structural parts which are sensitive to the vertical component of earthquake loads. In the pool type reactors, fluid-coupled out-of-plane vibration of redans, the thin shell structures that separate cold sodium and hot sodium, may be excited by vertical excitation. This paper presents an experimental and numerical study on the dynamic response of a simplified model of FBR (Fast Breeder Reactor) under vertical seismic excitation. The objectives of this study are to investigate the vertical vibration of redans and other structures and to validate the applicability of a finite element code for fluid-coupled systems to this specific problem. The test results showed that the most significant vibrational mode of the redan was an in-phase mode of the redan and the reactor's bottom. The FEM code could simulate the experimental results well.

1. はじめに

構造物と流体との連成振動は、原子力プラントや化学プラントで使用される種々の液体貯槽等において発生する場合があります。近年それら構造物の大型化、薄肉化にともなう固有振動数の低下は、耐震安全性の観点から重要な問題となっている。

これまでこの分野では、円筒タンクに代表されるような、比較的単純な形状を有する構造物を対象として数多くの研究がなされ^{1)~20)}、種々の知見が得られている。ところが、近年の各種プラント実機設計においては、複雑な形状を有する構造物も設計されるようになり、それら構造物に発生するであろう現象を詳細に解明するには、もはや有限要素解析に頼らざるをえない。有限要素解析を行うにあたり、一般的な構造体系であっても、それに対する解析モデル化手法については、いまだ十分に検討されていないものもあると思われる。

原子力プラントや化学プラントを構成する液体貯槽の中には、貯槽内に構造物を有するものも数多く存在する。21世紀における発電炉として期待されている、高速増殖炉(FBR:Fast Breeder Reactor)の原子炉容器もその1つである。図1に示すごとく、タンク型と呼ばれるFBRの原子炉容器は、冷却材として大量の液体ナトリウムを内含する、直径10~20m、板厚40~50cmのステンレス鋼製円筒容器であり、複数の炉内構造物を有している。これら炉内構造物の存在により、原子炉容器内には、狭いギャップで流体が連通するような、ほぼ密閉状態の流体領域が形成されており、地震時に、炉内構造物が、そのような流体領域を介して相互に連成振動することが考えられる。このような体系を有する構造物の流体連成振動現象に関しては、検討例も少なく、特に狭いギャップで流体が連通するような、密閉状態に近い流体領域について、解析モデル化手法は、確立されているとはいえない。

* (財)電力中央研究所 我孫子研究所 FBR部 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

** 株式会社東芝 原子力事業部動力炉開発部 (〒235 神奈川県横浜市磯子区新杉田町11番地)

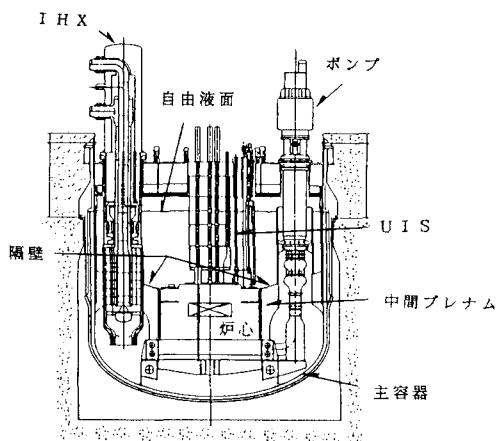


図 1 タンク型FBR原子炉構造

2. 解析コード概要

2.1 解析手法概要

本解析には、萩原ら^{24), 25)}が開発した有限要素法に基づく流体連成振動解析コードLISA (Liquid Inertia and Sloshing Analyzer) を適用した。LISAは、当初3次元体系を対象として開発されたが、本研究の実施にあたり、さらに柔軟なモデル化に対応できるよう、軸対称構造解析の機能が追加された。

LISAでは、流体領域は非圧縮のポテンシャル流れを仮定し、動液圧を未知量としてEuler流に記述している。一方、構造系については通常のLagrange流の要素を用いて運動方程式を立てており、流体の慣性力の効果を、構造物の質量マトリクスに重畳させた付加質量マトリクスとして取り扱っている。

なお、本コードは、流体構造物連成系運動方程式のうち、流体系に関わる行列のみを生成する解析コードであるため、ここでは、LISAで生成した行列群を、汎用時間領域動的応答解析コードTDAPに、ユーザ定義行列として構造データと共に読み込み、TDAPの動的応答解析機能を使用して解析を実施する。解析実施の際には、TDAPの解析機能の内、サブスペース法による固有値解析の機能を利用した。

2.2 軸対称解析解の精度の検討

ここでは、本FEM解析コード機能として、あらたに拡張された軸対称FEM解析精度を検討するため、千葉ら^{21), 23)}が求めた、液体を満たした円筒殻の解析解との比較を行う。比較に用いた解析解は、円筒殻と流体との連成振動問題を、自由液面および静液圧の影響を考慮し解析的に解いたものであり、実験値との一致も良好で十分信頼できるものである。

FEM解析モデルとその物性値を図2および表1に示す。要素分割については、円筒殻部を、軸対象シェル要素により32分割し、流体部は、軸対称流体要素により256分割した。

FEM解析結果と解析解の比較を、固有振動数、振動モードについてそれぞれ図3、図4(1)、(2)に示す。固有振動数については、FEM解と解析解は全域にわたり非常によく一致していることがわかる。円筒殻の振動モードもFEM解と解析解は非常によく一致していることがわかる。

以上より、本FEM解析コードの軸対称解析精度が確認できた。なお、計算実行にあたっては、電力中央研究所所有のHITAC M680Dを使用した。

本研究では、タンク型FBR原子炉構造における炉内構造物の内、隔壁構造を評価対象として取り上げ、狭いギャップで連通するような、ほぼ密閉された流体領域（以下、ほぼ密閉流体領域と記す。）を介した連成振動現象を、振動実験と数値解析の両面から検討する。本研究の目的は、以下のとおりである。

- ・ほぼ密閉流体領域を介した連成振動現象を、狭いギャップ部の流体連通効果の観点より実験的に確認する。
- ・この問題に対して、既に開発した解析コードの検証と解析モデル化手法の検討を行う。

このため、本研究では、隔壁構造および炉心部をモデル化した軸対称模型を製作し、振動台実験を実施した。さらに、開発した解析コードLISAを用いて解析を行い、実験結果と比較検討を行った。

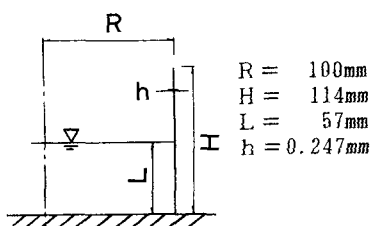


図 2 予備解析モデル

表 1 予備解析モデル物性値

ヤング率 E (Kg/mm^2)	5.67×10^2
ポアソン比	0.3
構造系密度 ρ_s (Kg/mm^3)	1.41×10^{-6}
流体密度 ρ_f (Kg/mm^3)	1.0×10^{-6}

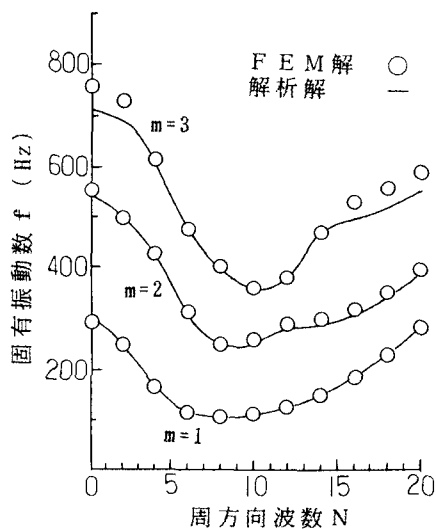
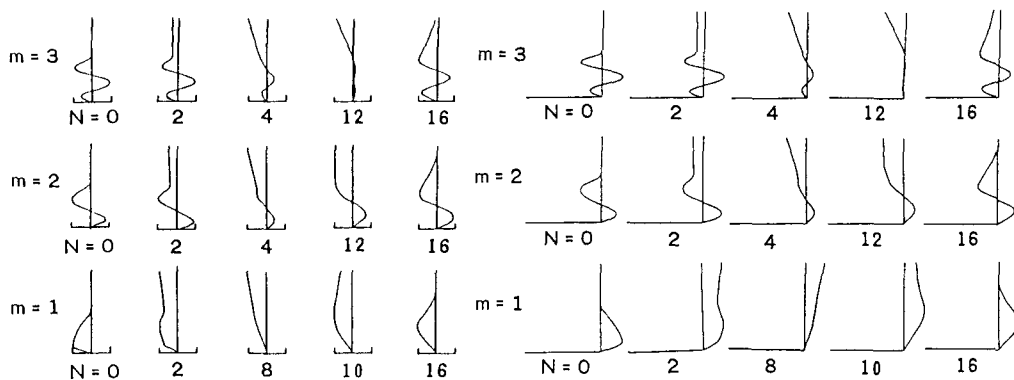


図 3 固有振動数解析値



(1) 解析解による振動モード

(2) FEM解による振動モード

図 4 振動モード図

3. FBR炉内構造物の上下加振実験

地震時におけるFBRの原子炉構造の流体連成振動に関しては、従来から主として原子炉容器を対象に、種々の検討がなされ、水平地震動下の挙動に関しては、ある程度、適切な評価が可能となっている²²⁾。一方、近年、原子力プラントの耐震設計研究の動向をみると、上下地震動に対する耐震安全性が検討されるようになってきており、FBR原子炉構造が、前述のように比較的薄肉であることを考えると、上下地震動に対しても、耐震安全性の評価を行っておく必要がある。

以上の観点より、本振動実験では、FBR炉内構造物である隔壁構造を対象とした、上下方向加振実験を実施した。

3.1 実験方法概要

模型は、図5に示すごとく、タンク型FBR原子炉中間プレナム部（炉内構造物である隔壁と炉心、炉心支持構造物で囲まれた領域）を対象にした、実機1/8スケール相当のものである。

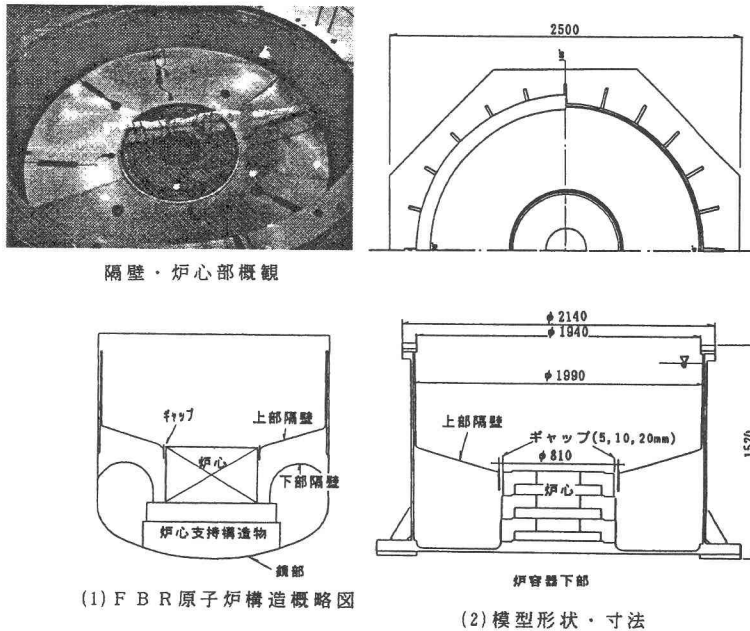


図 5 模型構造

実機同様、模型隔壁と炉心部には、狭いギャップが存在している。同図に示すごとく、模型は、実機構造の形状・剛性を配慮しつつ、比較的単純な軸対称構造とした。模型は、隔壁、主容器鏡部を模擬した円板と円板中央に設置される炉心、および以上の部材を収納、固定する外容器から構成されている。但し、ここでは、実機と模型との相似則については、特に配慮していない。

図5に示す炉心模擬体は、3つのおもりからなり、おもりのかさねあわせる順序をかえることにより、隔壁炉心開口部フランジと炉心間のギャップをかえられるようになっている。これにより、隔壁の振動特性に及ぼすギャップの大きさの影響を把握することができる。外容器底板の板厚は、実機上部隔壁と鏡部の剛性比を参考にして設定したものである。ただし、外容器胴部は、隔壁の流体連成振動現象に影響を及ぼさないよう剛に製作している（以下、炉心模擬体および外容器底板部をあわせて炉心部と呼ぶ。）。

容器内流体は、原子炉の冷却材である液体ナトリウムのかわりに常温、常圧の水を使用している。水深は、外容器底板より1330mmとした。

計測は、振動台入力加速度と模型各部の加速度さらには、外容器側壁にかかる、ほぼ密閉流体領域の動液圧について行った。実験データは、データレコーダ、電磁オシログラフに記録した。加振は、（財）電力中央研究所の水平上下2軸振動台（テーブル寸法4m×4m：最大積載重量10ton）により、加速度制御による上下方向加振である。

実験は、まず容器内に流体がない場合（以下気中と記す。）における、隔壁および炉心部の固有振動数、モードをそれぞれ決定した。次に、容器内に流体がある場合（以下流体有り」と記す。）において、隔壁・炉心部全体系の固有振動数、モードを決定した。なお、このケース実施にあたり、炉心部ギャップ大きさを20mm、5mmと変えて実験を行い、隔壁・炉心部全体系の振動特性に及ぼすギャップの効果を把握した。加振は、正弦波により行い、スイープ加振、あるいは共振N波加振を実験ケースにより適宜使い分け、共振振動数を決定した。

3.2 実験結果

図6、図7に共振曲線、振動モード図の1例をそれぞれ示す。これらの図は、ギャップ20mm、水位1330mmの構造体系条件のものである。図7(1)は、加速度共振曲線において卓越したピーク振動数28.0Hzにおけるモードである。これより、炉心部と隔壁が同位相で、ほぼ密閉領域の体積が変化せずに振動している様子がわかる。一方、同図(2)より炉心部は、ほとんど振動せず、隔壁のみが振動し、密閉領域の体積が変化している様子がわかる。

これらは、周方向波数 $N=0$ のモードであることがわかるが、本実験では、同図(3)に示すごとく、隔壁の周方向に波数 $N=1$ のモードも観察された。ここでは、実験で観察された3つの振動モードの内周方向波数 $N=0$ モードに関して、図7(2)に示すモードを1次、同図(1)に示すモードを2次モードと呼ぶこととする。

また、これら振動モードと共振曲線より、2次モードは、非常に刺激係数が大きく、1次モードおよび周方向波数 $N=1$ のモードは、小さいことがわかる。従って、2次モードは、上下動耐震設計上、重要なモードになると言える。

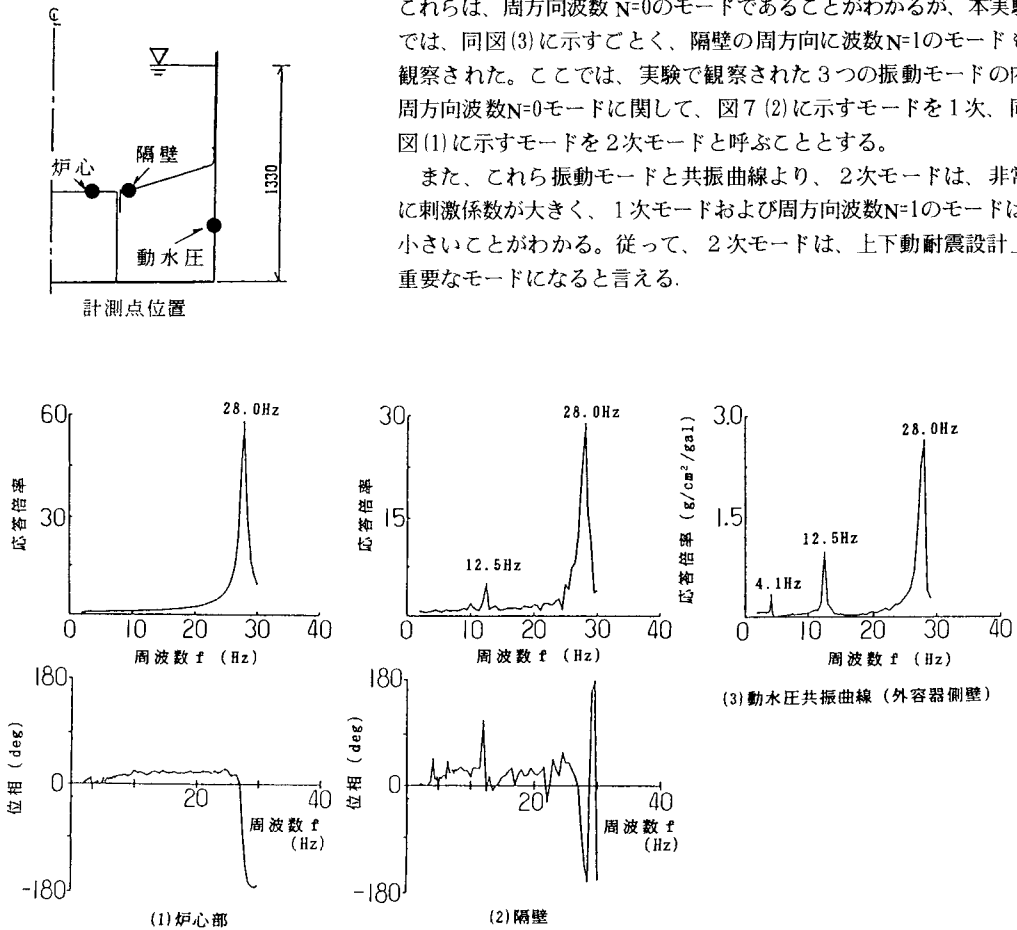


図6 共振曲線（ギャップ20mmの構造体系）

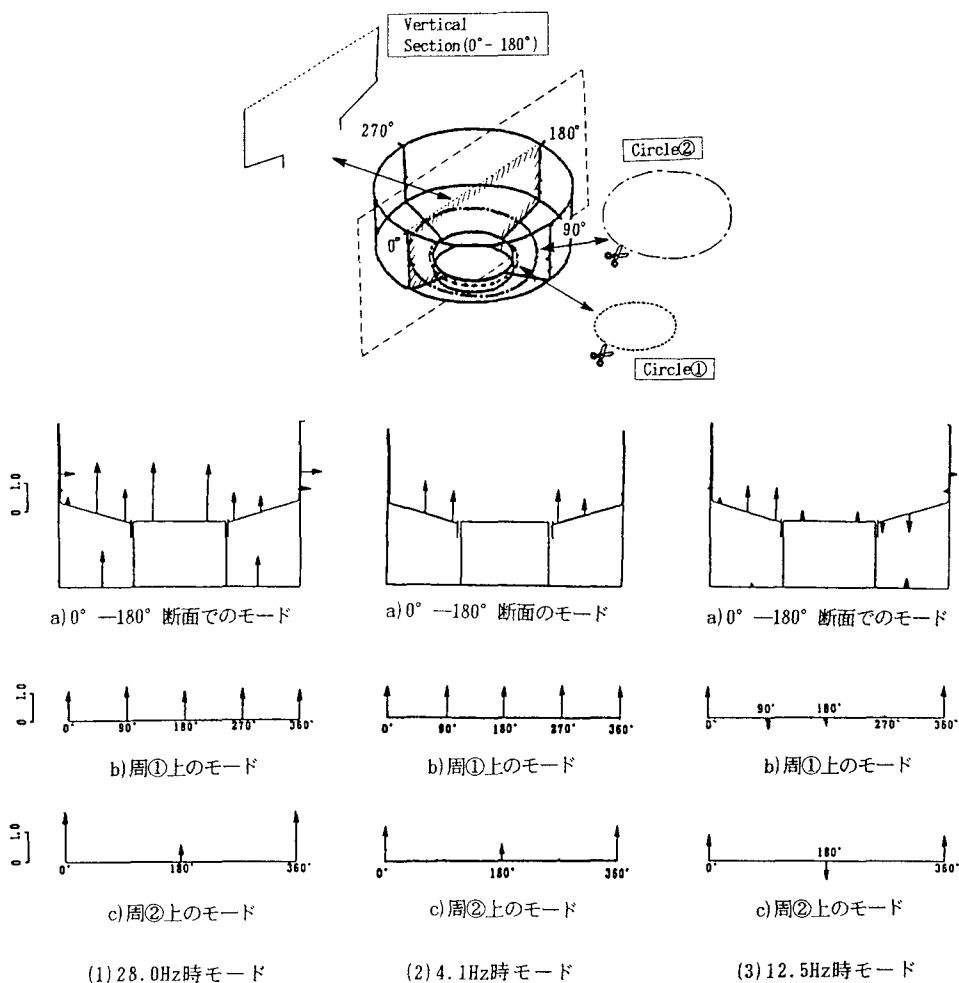


図 7 振動モード図

図6に示した共振曲線における加速度応答では、1次モード共振点が認められず、動液圧応答では、認められていることがわかる。これは、動水圧が主として、隔壁と炉心間の相対加速度に比例して生じるため、絶対加速度応答倍率が小さく相対加速度成分が入力加速度成分に埋もれてしまうような場合でも、わずかに生じている相対加速度を動水圧応答として捕らえたと考えられる。

ギャップ5mmの構造体系を有するケースの実験結果については、隔壁構造の振動特性に及ぼすギャップ連通効果の検討と併せて、次項にてまとめて述べる。

4. 実験結果と解析結果の比較検討

4.1 解析モデル

ここでは、上記の実験結果との比較により、解析モデル化手法の検討および解析コードLISAの適用性を検証した結果について述べる。検証は、周方向波数 $N=0$ を対象に固有振動数、振動モードについて行った。

まずはじめに、ギャップ部のメッシュ分割パターンが、隔壁の振動特性に影響を及ぼすことが考えられるため、分割に精粗の差異をつけた、複数のモデルを作成した。検討対象として、ギャップ20mmの構造体系の場合を取り上げた。図8に流体領域のメッシュを示す。同図には、メッシュパターンNo. 1, No. 4, No. 5を用いたモデルが示されている。

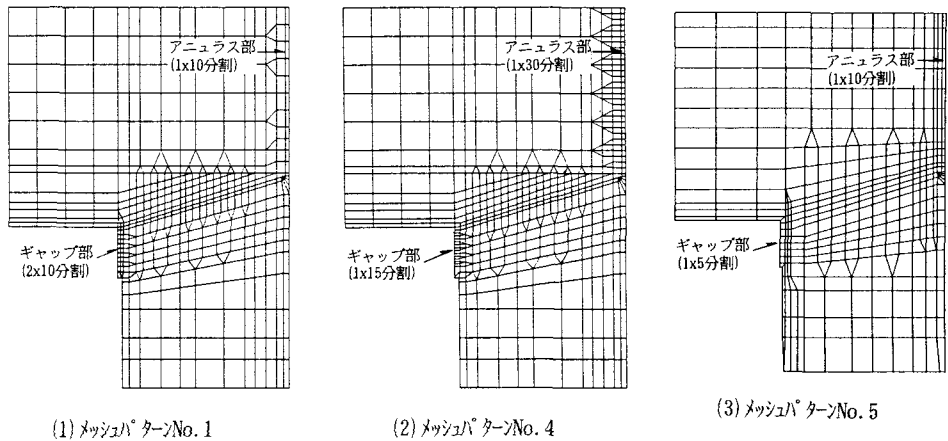


図 8 流体領域メッシュ例

図に示すごとく、各モデルともギャップ部メッシュパターン、アニュラス部メッシュパターンがそれぞれ異なっている。

流体領域および自由液面は各々軸対称流体要素と自由表面要素でモデル化した。構造物との連成面には、連成面要素を付加し、境界条件として自由液面の動水圧をゼロとおいた。なお、解析に使用した物性値を、表2に示す。

表 2 解析モデル物性値

物性 番号	構造部位	板厚 (mm)	材質	ヤング率 E (Kg/mm ²)	ポアソン比 ν	重量密度 ρ_s (Kg/mm ³)
1	外容器底板	25.0	炭素鋼	2.05×10^4	0.28	7.86×10^{-6}
2	隔壁	2.0	アルミ	7.17×10^3	0.33	2.70×10^{-6}

4.2 実験値と解析値の比較

表 3 メッシュパターン検討結果一覧

表3に、上記メッシュパターンより得られた解析値と実験値の比較一覧を示す。同表より、固有振動数解析値は、2次モードに関しては、いずれのメッシュパターンでも、解析値は、ほとんど同様であるだけでなく、さらには実験値とよく一致していることがわかる。しかしながら、1次モード固有振動数については、メッシュパターンの精粗により、解析値そのものに差異が生じていることがわかる。

メッシュ パター No.	ギャップ部 分割数	アニュラス部 分割数	固有振動数 (Hz)			
			解析値		実験値	
			1次	2次	1次	2次
1	2 X 10	1 X 10	3.94	28.03	4.1	27.9
2	4 X 5	1 X 10	3.85	27.93		
3	1 X 15	1 X 10	4.37	27.95		
4	1 X 15	1 X 30	4.36	27.95		
5	1 X 5	1 X 8	5.74	27.63		

特にギャップ部メッシュが比較的粗いNo. 3～5による解析値は、実験値との誤差が大きい。これは、密閉状態に近い流体領域の体積変化を伴うような振動モードでは、ギャップ部における流体の出入りにより、同部位における動液圧変化勾配が急激であることが予想され、このため、ギャップ部メッシュパターンが粗いと、現象を適切に評価できなかったということが考えられる。

No. 3とNo. 4の解析値を比較してみると、アニュラス部メッシュパターンの差異が、1次モード、2次モード固有振動数に与える影響は、ほとんどないと見なすことができる。これは、前節の実験結果で示した振動モードによれば、1次モード、2次モードともに、アニュラス部間隙はほとんど変化しないため、流体の連通がほとんどなく、その結果、動液圧変化勾配が緩やかであったためと考えられる。

以上のことから、ほぼ密閉流体領域の体積変化が生じるような振動モードでは、狭いギャップ部の流体連通効果が、構造側への付加質量効果として比較的大きな影響を及ぼすということがわかった。

表4に、本研究で実施した、全ての実験ケースに対応した解析結果を示す。同表より、1次モードに相当する固有振動数が3～4Hzに、2次モードの場合は、28Hz近傍であることがわかる。炉心単体の共振振動数が約28Hzであることから、2次モードの振動現象として、炉心部の共振にともない、ほぼ密閉流体領域を介して、隔壁の振動が誘起されたと考えられる。また、刺激係数解析値によれば、2次モードが卓越した振動モードであることがわかり、実験で確認された傾向とよく一致している。

図9にギャップ大きさと固有振動数の関係を示す。同図における解析結果は、先に示したメッシュパターンNo. 1を用いて得られたものである。同図によれば、2次モード固有振動数値そのものに関して、解析値と実験値はよくあっており、また、ギャップ大きさの変化にともなう固有振動数の変化についても解析値は、実験値の傾向をよくあらわしている。すなわち、ギャップ大きさが変わっても、固有振動数は、ほとんど変化していないことがわかる。解析値に着目してみると、ギャップ大きさが小さくなるにつれ、固有振動数もわずかながら低下しているのが読み取れ、2次モードでも、ギャップ連通効果が、わずかながら生じていると考えられる。一方、1次モードについても、解析値は、実験値の傾向をよく表わしている。すなわち、ギャップ大きさが小さくなるにつれ、固有振動数が低下している。これは、モード形状により、ギャップ部流体連通効果が異なり、その結果、構造側への付加質量効果に違いを生じさせているためと考えられる。つまり、1次モードのごとく、ほぼ密閉流体領域の体積が変化するような振動モードでは、ギャップ部大きさが、小さくなればなるほど、付加質量効果は大きくなる。

表 4 解析値と実験値の比較一覧

実験名称	gap (mm)	流体条件		加振方法	共振振動数 (Hz)			
		有無	水位		解析値		実験値	
					1次	2次	1次	2次
炉心単体	—	×	—	打撃 あるいは 共振正弦N波	34.01 (0.436)	—	33.7	—
		○	1330		27.92 (0.700)	—	27.8	—
隔壁単体	—	×	—		43.04 (0.100)	—	44.1	—
全体系A	20	○	1330	正弦波	3.94 (0.011)	28.03 (0.693)	4.1	27.9
全体系B	5			スイープ	2.97 (0.006)	27.62 (0.682)	3.1	27.9

備考(1) 流体：○…有り ×…なし

(2) 水位：外容器底板からの水位である。

(3) 共振振動数解析値 () 内数値は、刺激係数を表わす。

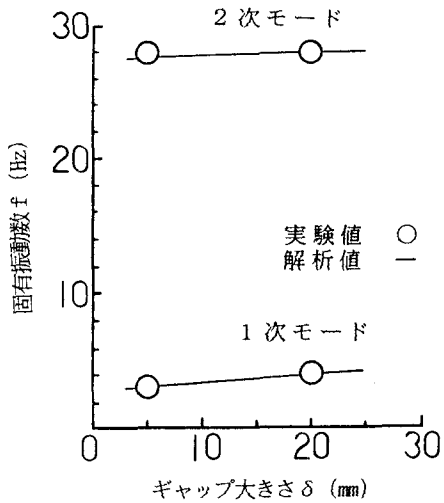


図 9 ギャップ大きさと固有振動数の関係

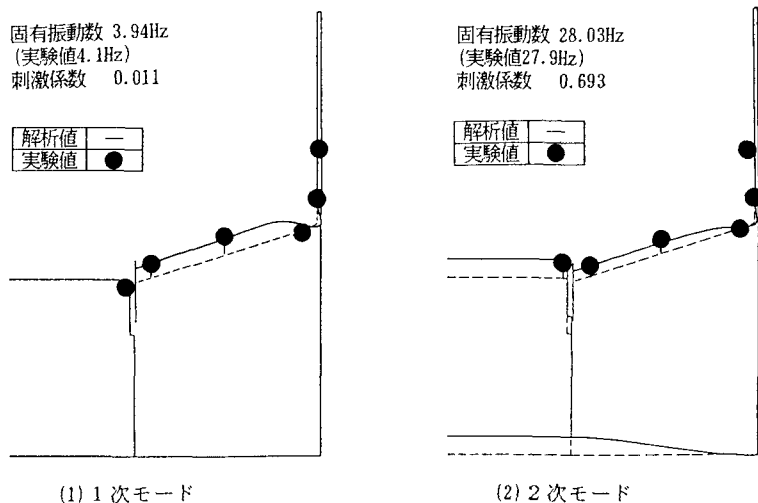


図 10 振動モード実験値と解析値の比較
(ギャップ20mmの構造体系)

図10にギャップ20mmの体系の振動モード解析値と実験値を併せて示す。これより、解析値は、実験値と概ねよく一致していることがわかる。

以上より、本解析コードが、ギャップ部モデル化を適切に行えば、ほぼ密閉流体領域を有する構造体系の振動特性を精度よくシミュレーションできることがわかった。

5. まとめ

本研究は、タンク型FBR原子炉隔壁構造を対象に、FEM解析コードによる数値解析と、上下方向振動実験の結果に基づいて、ほぼ密閉流体領域を有する体系の流体連成振動現象の把握と解析コード適用性、解析モデル化手法を検討したものである。検討の結果、以下の知見が得られた。

ほぼ密閉された状態の流体領域が狭いギャップで連通している場合、ギャップ部流体連通効果の大小が、構造側への付加質量効果に、少なからず影響するということがわかった。従って、ほぼ密閉流体領域を有する体系の解析モデル化手法として、特にギャップ部メッシュをある程度密にすれば、精度のよい解析結果が得られることが可能である。また、以上のことより、本問題に対する解析コードLISAの適用性があることが確認された。

謝辞

本研究は、隣芝殿との共同研究の成果の1部であり、同社機械研究所の藤本氏、片山氏には、貴重な意見を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) L.S. Jacobsen: Impulsive Hydrodynamics of Fluid inside a Cylindrical tank and of Fluid surrounding a Cylindrical Pier, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.39, No.3, 1949
- 2) G.W. Housner: Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, Bull. Seim. Soc. Am., Vol.47, 1957
- 3) W.H. Chu: Breathing Vibrations of a Partially Filled Cylindrical Tank-Linear Theory, Transaction of The ASME, Journal of

- Applied Mechanics, E30-4, 1963
- 4) A.S. Arya, S.K. Thakkar and A.C. Goyal: Vibration Analysis of Thin Cylindrical Containers, Proc. of ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 92 No. EM-2, 1971
 - 5) 坂井藤一、迫田治行：大型液体タンクの地震応答に関する研究、第4回日本地震工学シンポジウム論文集、1975-11
 - 6) 白木万博、藤田勝久：液体を含む自立型薄肉円筒タンクの地震応答解析、三菱重工技報、12巻、3号、1975-5
 - 7) A.S. Veletsos and J.Y. Yang: Earthquake Response of Liquid Storage Tanks, Advances in Civil Engrg. Through Engineering Mechanics, Proc. 2nd Engrg. Mech. Div. Spec. Conf., ASCE, 1977-5
 - 8) Clough, D.P: Experimental Evaluation of Seismic Design Methods for Broad Cylindrical Tanks, Univ. of California, EERC Rep., No. UCB/EERC-77/10, 1977-5
 - 9) 曾我部潔、重田達也、柴田碧：液体貯槽の耐震設計に関する基礎的研究、東京大学生産技術研究所報告、第26巻、第1号、1977
 - 10) A. Niwa: Seismic Behaviour of Tall Liquid Storage Tanks, Univ. of California, EERC Rep., No. UCB/EERC-78/04, 1978-2
 - 11) 越智義夫、浅井修、内藤潔：液体と円筒タンクの連成振動、石川島播磨技報、第18巻第1号、昭和53年1月
 - 12) 小松敬治：流体を満たす軸対称容器の振動解析（軸対称流体要素を用いた有限要素解析）、日本機械学会論文集C、45巻391号、昭和54年3月
 - 13) 近藤尚夫：円筒タンクの軸対称自由振動解析、日本機械学会論文集、46巻405号、昭和55年5月
 - 14) 藤田勝久：自由液面振動を考慮した液体貯蔵円筒タンクの地震応答解析（続報、エネルギー法による取扱い）日本機械学会論文集C、47巻422号、昭和56年10月
 - 15) 坂井藤一、磯江暁、小川浩：円筒形液体タンクの鉛直加振によるバルジング振動の解析、第16回地震工学研究発表会、土木学会、1981-6
 - 16) 坂井藤一、小川浩：ロッキングを考慮した円筒形液体タンクのバルジング振動、第6回日本地震工学シンポジウム、1982-12
 - 17) M.A. Haroun and G.W. Housner: Dynamic Characteristics of Liquid Storage Tanks, Proc. of ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 108 No. EM-5, 1982
 - 18) M.A. Haroun and G.W. Housner: Complications in Free Vibration Analysis of Tanks, Proc. of ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 108 No. EM-5, 1982
 - 19) W.K. Liu and D.C. Ma: Coupling Effect between Liquid Sloshing and Flexible Fluid-Filled Systems, Nuclear Engineering and Design, Vol. 72, 1982
 - 20) F. Sakai, H. Ogawa and A. Isoe: Horizontal, Vertical and Rocking Fluid-Elastic Response and Design of Cylindrical Liquid Storage Tanks, 8th WCEE, San Francisco, 1984-7
 - 21) 千葉正克、八巻昇、谷順二：部分的に液を満たした片持ち円筒殻の自由曲げ振動、日本機械学会論文集C、50巻453号、昭和59年5月
 - 22) A. Sakurai, et al: Fluid-Coupled Vibration Analysis of Reduced Models of a Large Pool Type LMFBR in Japan, 8th SMIRT, Vol. EK1/8, 1985
 - 23) 谷順二、寺本潤一：部分的に液体を満たした軸対称殻の自由振動解析、日本機械学会論文集、54巻497号、昭和63年1月
 - 24) 萩原豊、増子芳夫、栗原千鶴子：3次元流体-構造物連成振動解析コードの開発とタンク型FBRの地震時スロッシング応答解析、電力中央研究所報告 NO. U90009, 1990
 - 25) 萩原豊、増子芳夫、栗原千鶴子：円筒容器内の構造物が地震時スロッシング現象の及ぼす影響、構造工学論文集、Vol. 37A, 1991

(1991年9月30日受付)