

地震動を受ける二重円筒容器の流体連成動的座屈挙動

Seismic-induced buckling of a fluid-filled concentric cylindrical tank

豊田幸宏*、松浦真一**
Yukihiro Toyoda and Shinichi Matsuura

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

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

The Fast Breeder Reactors' thermal liners are multi-walled coaxial cylindrical shells. In the seismic design of the shells, it is very important to prevent the dynamic buckling due to seismically induced hydrodynamic effects. The objectives of this study are to clarify the phenomena of fluid-coupled buckling of the thermal liners and to validate the applicability of the original computer program which has the capability of elastic-plastic dynamic buckling analysis including fluid-structure interaction. Non-linear earthquake response analyses of a simplified fluid-coupled system of the thermal liners and the reactor vessel were performed in order to investigate the seismic-induced buckling behavior of the thermal liner due to hydrodynamic pressure. The transient response of the liner and the buckling deformation were investigated. Furthermore, the applicability of the computer program was shown through comparing with the results of the test data and the numerical simulations.

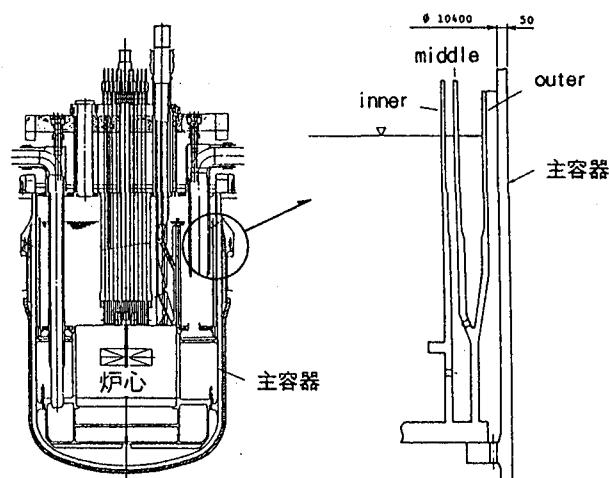
Key Word, Dynamic buckling, Concentric cylindrical shell, Fluid structure interaction

1. はじめに

高速増殖炉の原子炉構造には、原子炉容器を高温の冷却材から熱的に保護するために、炉容器の内側に、炉壁冷却ライナーと呼ばれる多重円筒シェル構造物が設置されている(図-1)。これらのライナー円筒は、炉容器に比べると比較的薄肉のシェル構造物であるため、地震時に冷却材を介し、ライナー同志あるいはライナーと炉容器間に連成振動が発生する。そのため、地震入力条件によっては、連成振動によって発生する流体圧によりライナー円筒に動的座屈が起こる可能性がある。比較的小規模な石油タンクにおいても、同様なライナー構造が見受けられるが¹⁾、ライナー円筒に補強リングを取り付けることによって、地震時における外圧座屈の発生を防止している。しかしながら、高速増殖炉のライナー円筒の場合、プラント起動中は、500℃に近い高温の流体と接することから、高温構造設計の観点から、石油タンクの耐震設計で採られている考え方を踏襲して、補強リングをライナー円筒に取り付けることは困難である。従って、流体圧によるライナー円筒の座屈に対する合理的な耐力評価法の確立が設計上必要となっている。

このような問題に対し、前報²⁾にて、著者らは、高速増殖炉のライナー構造を模擬した二重円筒小型模型(実機の約1/20スケール)による振動台試験ならびに、独自に開発した解析プログラム³⁾を用いた試験シミュレーション解析を実施し、下記の知見を得た。

- ・ 模型ライナー円筒に、流体外圧による弾性座屈が発生し、座屈変形については、周方向に花びら状の変形を伴ったものであることを実験的に確認した。
- ・ 上記試験において観察された模型ライナー円筒の最大

構造材: ステンレス
冷却材: 液体ナトリウム

unit:mm

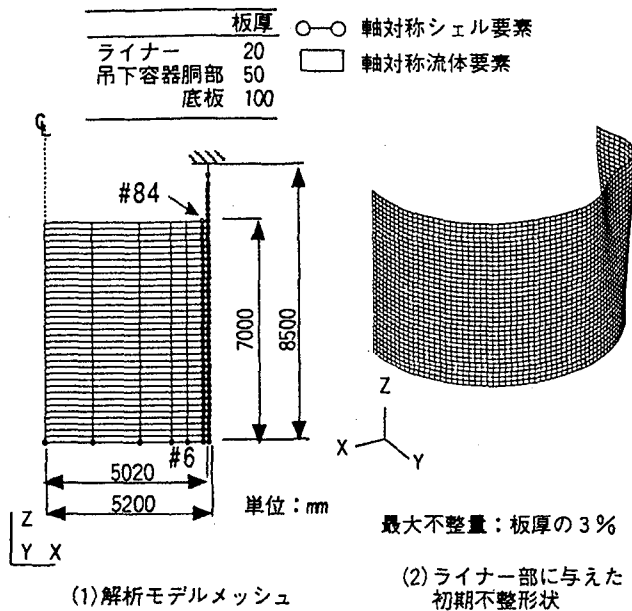
ライナー	内径	板厚
inner	φ 9980	15
middle	φ 10020	20
outer	φ 10260	20
主容器	φ 10400	50

	半径板厚比
inner	333
ライナー円筒 middle	251
outer	257
主容器	104

図-1 高速増殖炉原子炉構造例

変位応答値、座屈変形ならびに過渡応答波形等について、解析結果は、実験結果とほぼ整合し、開発した解析プログラムの適用性を確認した。

本研究で取り扱う問題に対しては、容器内部の流体の影響までを考慮した詳細な検討が必要となるが、試験のみで、円筒形状パラメータ、形状不整等の影響をすべて評価することは実質不可能である。従って、パラメータスタディの多くは、有限要素法等による数値解析に負う



図一2 ライナーを有する円筒容器モデル

ことになる。

鋼製円筒容器の地震時座屈問題に対して、地震力や内容液の影響を静的な荷重に置き換え、有限要素法を用いて、静的解析を実施したものは比較的多く見受けられる^{4)~6)}。その一方で、流体連成動的座屈現象を時刻歴応答で直接追ったものとなると、検討事例は極端に少なくなる。著者らの前報²⁾はその1つになるが、石油タンク等に代表される平底円筒容器を対象に、Harounら⁷⁾、Rammerstorferら⁸⁾の数値解析的検討が挙げられる。彼らは、いずれも独自の有限要素解析プログラムを作成し、円筒容器下端部にElephant-foot bulge変形が生じる座屈現象等に関し、数値シミュレーションを実施している。しかしながら、彼らの対象とした現象は、転倒モーメントによって誘起される軸圧縮力が主たる要因の座屈現象であり、現象そのものが本報にて取り扱う現象とは異なっている。原子力分野では、高速増殖炉の炉容器を主たる対象としたCombescureらの一連の検討^{9)~11)}がある。彼らは、非軸対称荷重に対しても流体連成動的座屈解析に適用できる軸対称有限要素解析プログラムを作成し、振動台試験ならびに試験シミュレーション解析を実施しており、それらの中には、二重円筒容器の流体連成座屈を取り扱った検討がある。そこでは、試験結果や解析結果について概略の記述がなされているだけで、現象の詳細や解析精度等については十分に把握することはできないが、彼らの検討は、本研究の対象とする現象に近いものを取り扱っており、先駆的な検討事例である。有限要素法を用いた動的座屈解析の事例として、流体の影響を解析条件に含めていないものであっても、既往の検討事例は限られる。原子炉容器を想定した円筒殻のせん断曲げ動的座屈解析を行った大坪らの研究¹²⁾、Combescureらの作成した解析プログラムを用いて、原子炉容器のせん断曲げ座屈現象に関する数値解析的検討を実施したJullienらの

表一1 解析用物性値

		弾性係数 E (GPa)	質量密度 ρ (kg sec ² /m ⁴)	ポアソン比 ν
構造部	ライナー	159	7.97×10^{-10}	0.302
	容器胴部	159	7.97×10^{-10}	0.302
	容器底板	159×10^2	2.69×10^{-8}	0.302
流体部		—	0.85×10^{-10}	—

研究¹³⁾、原子炉格納容器を対象とした久田らの研究¹⁴⁾、さらには鋼製円筒橋脚を対象とした中村¹⁵⁾、後藤ら¹⁶⁾の研究が見受けられる程度である。その他、数値解析の事例ではないが、福山ら¹⁷⁾は、本研究と同じ目的の下、二重円筒殻の小型模型（実機1/20スケール）を用いた振動台試験を実施し、ライナー円筒の流体連成動的座屈挙動に関する貴重な実験データを得ている。

以上、本研究で対象とするライナー円筒の動的座屈現象と同様なものを取り扱った既往の検討事例はほとんどない。また、流体との連成を考慮した動的座屈解析を行うにあたっては、著者らも含め、いずれも独自の解析プログラムを用いていることが共通点である。これは、既存汎用構造解析コードにより動的座屈解析を実施することは、計算資源の制限やコストの観点から実質的に不可能であることを物語っている。

本研究は、高速増殖炉の炉壁冷却ライナーのごとく多重円筒シェルの地震時流体連成座屈現象を明らかにし、合理的な座屈耐力評価法を確立することを目的とする。このため、本報では、実際の原子炉構造を想定した、ライナーを有する円筒容器の有限要素モデルを用いて、ライナー円筒の基本的な地震時座屈挙動を、人工地震波を入力波とした地震応答解析により数値解析的に把握する。本解析に用いるプログラムは前報²⁾と同様の解析プログラム³⁾であり、前報²⁾では未着手であった、地震時流体連成動的座屈解析への同プログラムの適用性について、併せ明らかにする。

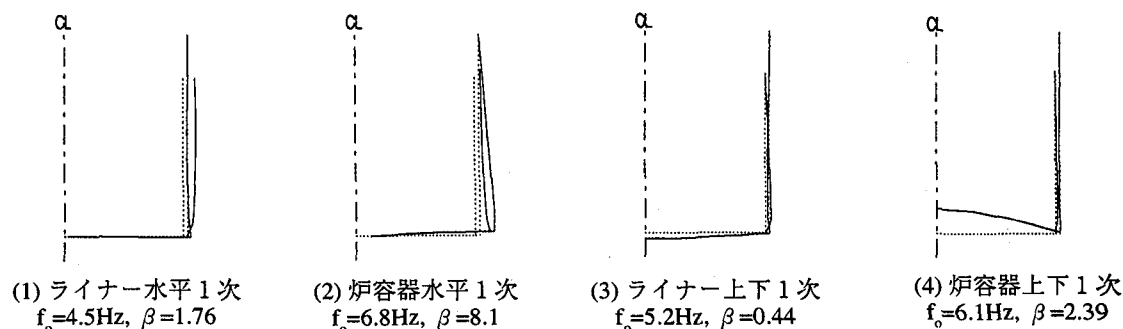
2. ライナーを有する円筒容器の非線形地震応答解析

2.1 概要

本章では、実際の原子炉構造を想定した、ライナーを有する円筒容器の有限要素モデルを作成し、開発した軸対称要素を用いた解析プログラム³⁾によるシミュレーション解析から、ライナー円筒の基本的な地震時座屈挙動を把握する。併せ、実際の原子炉構造を対象とした地震時流体連成座屈解析に対する、同プログラムの適用性を明らかにする。

以下の節では、下記の項目に関するシミュレーション解析結果を示すこととする。

- ・ライナー円筒の線形振動挙動から大変形の座屈に至るまでの過渡応答挙動
- ・最大入力加速度とライナー円筒の最大変位応答等の関係



図－3 固有振動モード形状 (β は刺激係数)

- ・ライナー円筒の過渡応答挙動や最大応答値に対する水平地震動と上下地震動の同時入力の影響
- ・ライナー円筒に発生する座屈変形
- ・ライナー円筒に作用する動水圧の分布形状

2.2 解析方法

(1) 解析プログラムの概要

動的座屈解析を実行するにあたっては、大幅な計算効率の向上を図ること、安定な計算過程を実現することが非常に重要である。これらの点に配慮し、本解析プログラムでは、変位等を周方向にフーリエ級数展開した軸対称シェル要素を用い、大変形、弾塑性の取り扱い方法に関して効率的な計算方法を採用している。また、流体の影響については、流体を非圧縮、非粘性、非回転流れのポテンシャル流れと仮定し、運動方程式において、流体の影響を付加質量マトリクスとして、構造物の質量マトリクスに足しあわせる方法を採用している。

本解析プログラムによれば、解析対象が軸対称形状に限られるものの、一般シェル要素を用いた場合に比較して、はるかに少ない計算時間で同程度の解析精度を得ることが可能となった^{3),12)}。また、著者らは、既報¹⁸⁾や前報²⁾にて、振動台試験のシミュレーション解析を実施し、流体連成座屈解析機能に関する妥当性を確認している。

なお、本解析プログラムの定式化の詳細については、文献³⁾を参照されたい。

(2) 解析モデル

図－2に示すように、本解析では、実際の構造を単純化した軸対称有限要素モデルを用いた。先の図－1に示すように実機は、炉容器と3枚のライナーからなる四重円筒構造であり、さらには他の炉内機器がライナー構造の内部に存在しているが、

- ・本解析が、ライナー円筒の地震時座屈挙動に関し、基本的な現象の把握に主眼をおいていること。
- ・炉容器等の円筒容器側の基本的な振動特性には内部炉内機器の存在はほとんど影響を与えないことが実験的に把握されていること¹⁹⁾。

等の理由から、本解析モデルは、ライナー円筒1枚と炉容器を模擬した二重円筒構造とし、他の炉内機器について

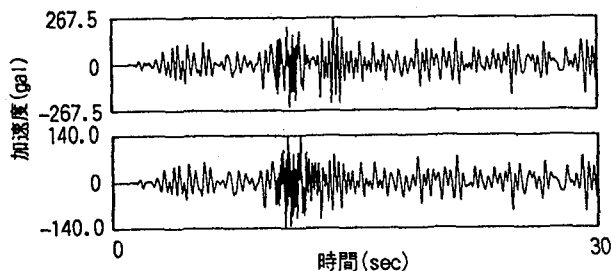
は、モデル化の範囲から除いたものとなっている。

表－1に示すように、本解析モデルのライナー円筒や炉容器胴部の板厚については、実機における公称値を用い、弾性係数等の材料物性値については、通常運転時500℃条件下における設計用公称値を用いた。また、本解析モデルでは、炉容器の底板部に、水平動に対する実機炉容器の1次固有振動数約6.5Hzとほぼ等しくなるように、質量を付加し、実際の炉心構造部分の影響を模擬することとした。図－3に本解析モデルの振動固有値解析結果を示す。本解析モデルにおけるライナー円筒の1次固有振動数については、実機原子炉構造全体系を有限要素法にて振動固有値解析を実施した結果¹⁹⁾とほぼ一致している。一方、炉容器については、水平方向入力に対する振動固有値は、上記の実機全体系の解析結果とほぼ一致したものであったが、上下方向入力に対する振動固有値は、実機約9Hzに比べ3Hzほど低めの値となった。

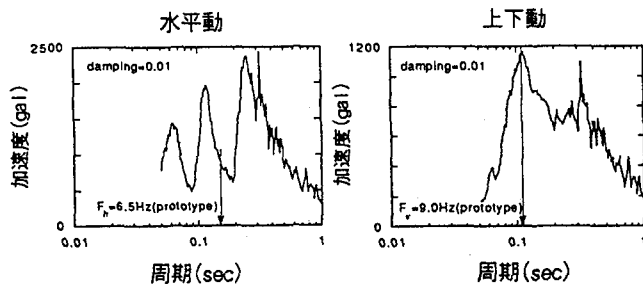
本解析モデルに与えたフーリエ波数成分については、0～11波とした。解析モデルに与えるフーリエ波数成分を決定するにあたっては、前報²⁾の検討結果を参考にした。初期不整形は、図－2(2)に示す形状を、最大不整形がライナー円筒上端部にて、板厚の3%程度となるように与えた。この形状は周方向波数が6波を有するものであり、前報²⁾にて実施した座屈固有値解析から求めたものである。これは、円筒構造の座屈強度に対して最も厳しい形状不整がある場合を想定したことになる。有限要素の分割方法や形状不整の与え方等における基本的な考え方は、「座屈解析法の適用ガイドライン」²⁰⁾に従ったものである。

減衰については、実機炉容器の1次固有振動数6.5Hzを基準振動数として、剛性比例型のRayleigh減衰1% ($\alpha=0, \beta=0.00049$)を与えた。なお、本解析モデルの炉容器は、実機と同様に上端に固定端を有し、吊り下げられた条件を有しているが、炉容器、ライナー円筒や内容液の自重については、ここでは、考慮していない。

さらに、本解析モデルにおけるライナー円筒には、前報²⁾に述べた検討結果から、外圧座屈の発生が予想できるため、次式で示される外圧座屈の発生する円筒シェルにおける、弾性座屈、非弾性座屈発生の目安となる、薄さ



(1) 加速度時刻歴波形(上段：水平方向、下段：上下方向)



(2) 加速度応答スペクトル

図—4 解析に使用した人工地震動（基準波）

表—2 解析ケース一覧

	最大加速度入力レベル 基準波に対する倍率	入力方法		備考
		水平のみ	水平上下同時	
1	1.0	○	○	最大入力加速度：水平267.5gal 上下140.0gal
2	1.0	○	○	
3	1.25	○	○	
4	1.25	○	○	
5	1.5	○	○	
6	1.5	○	○	
7	2.25	○	○	
8	2.25	○	○	

係数²¹⁾の値を調べ、材料非線形性を解析モデルに取り込むことの必要性について予め検討した。

$$K = \left(\frac{2R}{t}\right)^3 \sqrt{\frac{L}{R}} \left(\frac{\sigma_y}{E}\right) \quad (1)$$

$K_c < 0.8$ 降伏崩壊

$0.8 < K_c < 1.2$ 非弾性座屈

$1.2 < K_c$ 弾性座屈

ここで、R：円筒半径 E：弾性係数

L：円筒高さ σ_y ：降伏応力

t：円筒板厚

本解析モデルの場合、 $K_c=2.6$ となり、弾性座屈の発生が予想されることから、本解析では材料非線形は考慮しないこととした。

(3) 解析に用いた入力地震波

図—4に、本解析に用いた、水平方向ならびに上下方向入力地震波ならびにそれぞれの加速度応答スペクトルを示す。応答スペクトルの図中には実機炉容器の1次固有振動数を矢印で併せ示した。図—4に示した地震波は、比較的硬い岩盤上 ($V_s=1500\text{m/s}$ 程度) に立地することを想定した半埋込原子炉建屋における、原子炉容器据え付けレベルの地震動として計算された人工地震波²²⁾である（以下、本地震波を基準波と記す）。

(4) 解析ケース

解析ケース一覧を表—2に示す。解析のパラメータは、地震波の最大加速度レベル（4レベル：基準波の1倍、1.25倍、1.5倍、2.25倍）と上下動入力の有無（水平動のみ、水平動と上下動同時入力の2通り）とした。以下、地震波の入力加速度レベルについては、基準波（水平動最大加速度267.5gal、上下動最大加速度140.0gal）を基本単位とし、基準波×1.25、基準波×1.5等と記述し、入力方法については、水平動のみの場合を水平、水平動と上

下動を同時入力した場合を水平+上下と記述することとする（例：入力レベルが基準波の1.0倍で水平動のみ入力した場合は基準波×1.0水平と記す）。水平動と上下動を同時入力したケースについては、水平動と上下動における最大加速度の比率を、基準波の比率のままにして、入力レベルを大きくした。また、本解析モデルにおけるライナー円筒の応答の代表点として、ライナー円筒最上端（図—2、節点#84）を選び、炉容器については、容器底板部ライナー円筒の最下端（図—2、節点#6）を選択した。

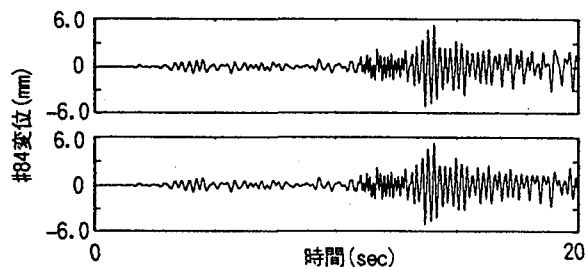
(5) 時間積分

入力地震動の主要動部分を完全に含む0～20秒間の時間積分をニューマークの β 法（ $\beta=0.27$ ）を用いて実施し、時間刻みについては、一律0.01secとした。

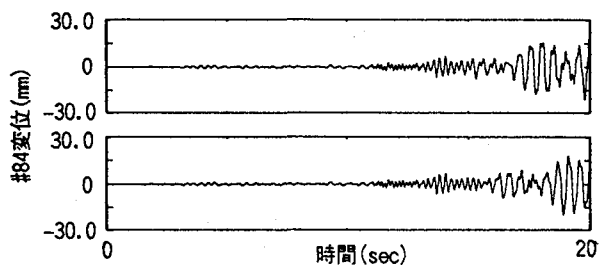
2.3 解析結果

(1) 過渡応答特性

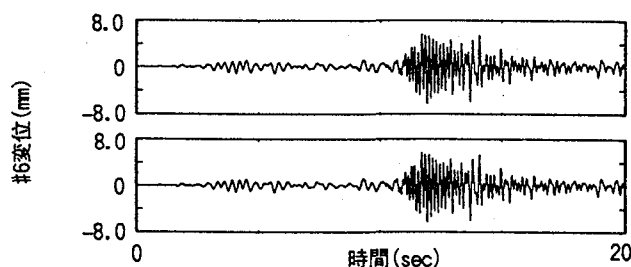
図—5に、水平方向（図—2におけるX方向）の変位応答波形の例を示す。上段は、水平の場合、下段は、水平+上下の場合の結果を示している。まず、水平動と上下動同時入力の影響について着目し、各ケースにおける過渡応答波形の比較を行う。図—5によれば、いずれの入力レベルにおいても、入力方法の違いにかかわらずライナー円筒の過渡応答波形の様子にほとんど大差のないことがわかる。炉容器応答については、同図(3)に示すように、入力方法の違いによらず、過渡応答波形の様子に全く違いは見られない。他のケースにおいても、入力方法の違いにかかわらず、過渡応答波形の様子には、顕著な違いは認められなかった。次に、入力加速度レベルによる過渡応答波形の様子の違いに着目する。入力加速度レベルが基準波×1.0（図-5(1)）と基準波×1.25（図-5(2)）の場合それぞれにおけるライナー円筒上端部の水平方向応答変位波形を両者比較してみると、時刻15秒あたりから顕著な違いが認められる。後者のケースにおいては、比較的低い振動数成分を有する波形が発生し、ライナー円筒に大きな応答変位が生じていることがわかる。基準波×1.25の場合について、ライナー円筒と炉容器の過渡応答を比較してみると、炉容器の変位応答については、時刻15秒前に最大応答値が既に発生し、それ以降は応答が



(1) 基準波×1.0におけるライナー円筒上端部の水平方向応答

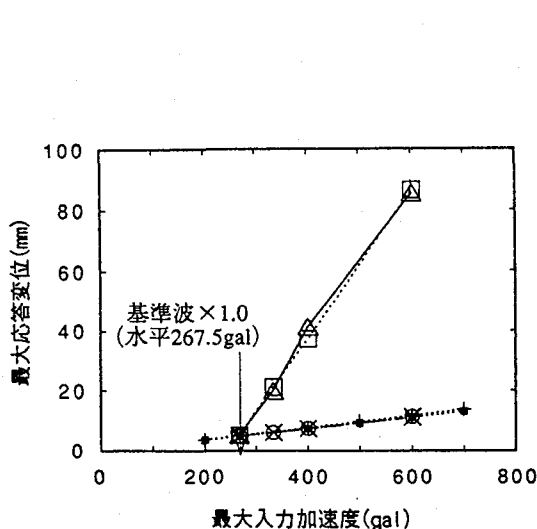


(2) 基準波×1.25におけるライナー円筒上端部の水平方向応答

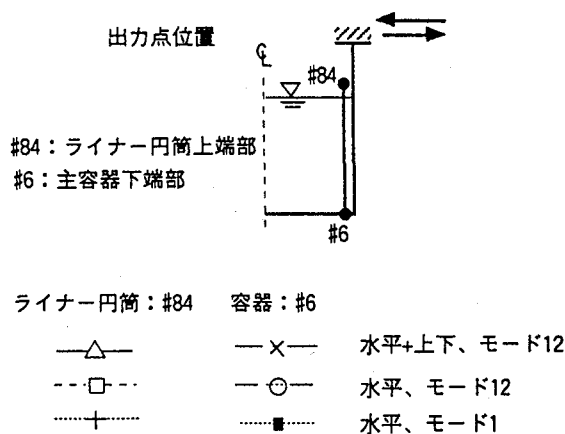


(3) 基準波×1.25における容器下端部の水平方向応答

図－5 過渡応答波形の例 (上段：水平動のみ入力した場合、下段：水平動と上下動を同時入力した場合)



図－6 最大入力加速度と最大応答変位の関係

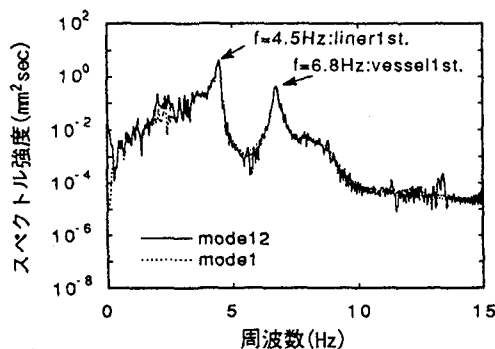


徐々に小さくなりつつあるのにもかかわらず、ライナー円筒には、それより2秒程度遅れて低い振動数成分を有する波形が発生している点は興味深い。なお、入力加速度レベルが基準波×1.25より大きいケースについては、いずれも、時刻15秒前後から、上記と同様に、比較的低い振動数成分を有する波形が発生し、ライナー円筒に大きな応答変位が生じていた。

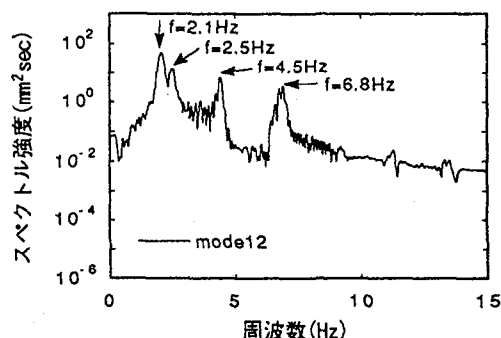
このような現象は、著者らや福山らの行った模型実験²⁾においても、報告されているが、実験に用いられた入力波は、地震波ではなく正弦波であった。調波振動入力下における円筒殻の非線形振動現象に関しては、数多くの実験や解析がなされているが、本解析のように、地震波入力下における円筒殻の非線形応答を、時刻歴で直接

追ったものは他に例をみない。

図－6にライナー円筒ならびに炉容器の水平方向最大応答変位と最大入力加速度レベルの関係を示す。図－7にライナー円筒の変位時刻歴波形のパワースペクトルを、代表例として基準波×1.0水平ならびに基準波×1.25水平の場合について示す。図－6と図－7(1)には、本解析モデルにフーリエ波数成分1のみ与えた場合の解析結果(以下、線形解析結果と記す)も併せ示した。図－6によれば、ライナー円筒の最大変位応答値は、基準波×1.0の加速度レベルまでは線形解析結果と一致しており、ライナー円筒の動的挙動は、線形応答範囲であることがわかる。また、入力加速度レベルが基準波×1.25以上となると、線形挙動をはずれ、入力加速度レベルが、さらに増

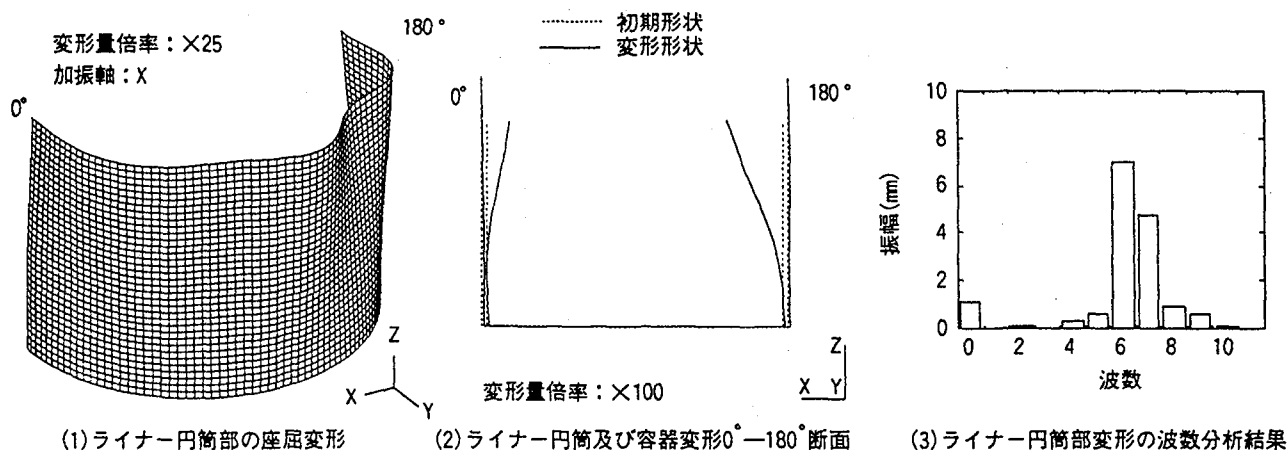


(1) 基準波×1.0水平: $a_{max}=267.5\text{gal}$



(2) 基準波×1.25水平: $a_{max}=334.4\text{gal}$

図ー7 ライナー円筒応答変位(#84)のパワースペクトルの例



図ー8 時刻 $t=19.20\text{ sec}$ におけるライナー円筒の変形: 基準波×1.25水平

加するにつれ、最大変位応答値は、急激に増大する傾向のあることもわかる。図ー7(2)に示す基準波×1.25水平の場合におけるパワースペクトルをみると、図ー3に示したライナー円筒の片持ち梁振動モード振動数4.5Hzと、炉容器の片持ち梁振動モード振動数6.8Hzの他に、ライナー円筒の片持ち梁振動モード振動数4.5Hzの約1/2となる、2.1Hzと2.5Hzの振動数成分が発生していることがわかる。これら振動数成分には、ちょうど $2.1+2.5 \div 4.5$ の関係が認められることから、本解析から得られた現象は、梁や円板等の弾性体の非線形振動現象として良く見られる結合形不安定振動現象と類似したものと思われる。通常、結合型不安定振動などの非線形振動現象では、振幅が不連続に増大する現象がよく見受けられることから、本結果でみられた応答の増大も、同様なメカニズムによるものと考えられる。なお、円筒の片持ち梁振動モード(4.5Hz)、と、2つの振動成分(2.1Hzと2.5Hz)の振動モードの関係については、後述(2)の座屈変形の項目にて述べることにする。

次に座屈発生点について考えてみると、先に示した図7(2)に示すごとく、振動数2.1Hzと2.5Hzのスペクトル強度は、ライナー円筒や炉容器の水平1次のものより卓越している。過渡応答波形をみても、ライナー円筒に大

変形至らしめた主たる振動数成分は、2Hz前後のものであり、前報²⁾に述べた座屈発生定義に従えば、それらからはっきりと確認できる基準波×1.25以上の入力加速度レベルの条件を有する解析ケースにおいて、流体連成座屈が発生したものと考えられる。基準波×1.25のケースにおいては、その過渡応答波形から、2.0Hz前後の振動数成分をはっきりと確認することのできる、時刻 $t=16.00\text{sec}$ 以降に座屈が発生したもの判断される。以下、本報では、基準波×1.25の入力加速度レベルを座屈限界加速度とみなし、その時の最大応答変位21.3mmをライナー円筒の座屈変位とみなすことにする。一方、炉容器応答については、図ー6に示すように、いずれの解析ケースにおいても、線形解析結果と完全に一致しており、明らかに線形応答範囲である。また、水平動のみ入力した場合と水平動と上下動を同時入力した場合は、ライナー円筒及び炉容器とも、それぞれの最大応答変位値については、違いはほとんど認められないこともわかる。

なお、上記の1解析ケースあたりの計算時間、即ち地震波20秒間の応答計算に要した時間は、スーパーコンピュータHITACHI S3800/240(最大ベクトル性能8GFLOPS)にて約25時間であった。昨今の計算機能力の飛躍的向上を考えれば、さらに計算時間は短縮されるこ

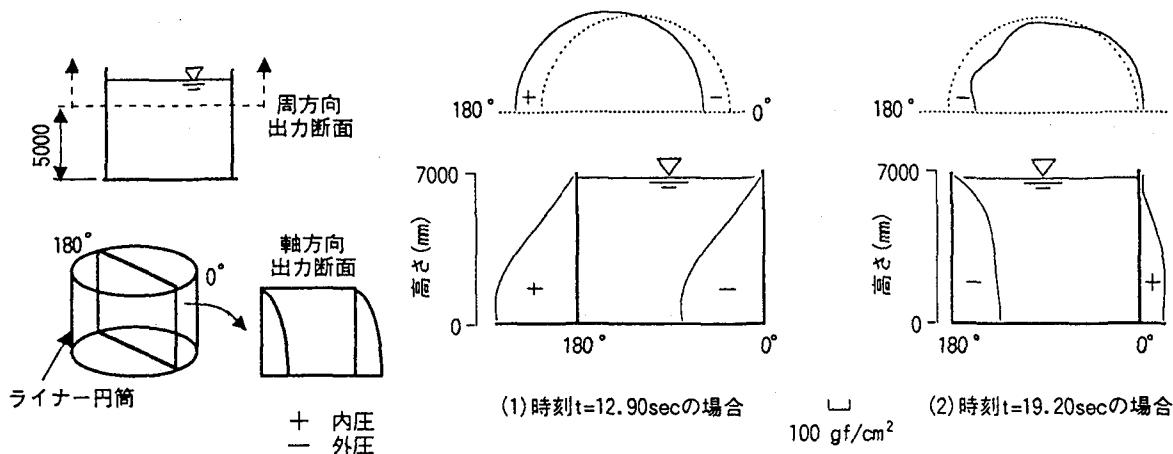


図-9 ライナー円筒に作用する流体圧の分布形状：基準波×1.25水平

とが十分期待でき、今回の計算時間は、従来の汎用構造解析コードの場合に比べて、十分実用的なものであると判断できる。

(2) 座屈変形

図-8にライナー円筒の座屈変形を示す。同図(1)(2)は、基準波×1.25水平の入力レベルにおける応答計算の内、時刻 $t=19.20\text{sec}$ における時間断面を、同図(3)は、ライナー円筒上部における変形状の波数分析結果を示したものである。これらによれば、炉容器が片持ち梁振動モードで応答しながら、ライナー円筒に座屈変形が生じ、この変形状は、円筒の周方向波数6および7のモードが卓越したものであることがわかる。これら、波数6および7のモードが発生したことは、先の図-7(2)に示したように、ライナー円筒と炉容器の水平1次モードに対応する固有振動数の他に、2.1Hzと2.5Hzの振動数成分が発生したことに対応する。Tukimori²⁴⁾は、液体を満たした上端自由、下端固定のシェルの初期不整量の大きさが、モード連成を伴う不安定振動現象に及ぼす影響について数値解析の検討を実施している。そこでは、初期不整が全くない場合から不整量を半径の1%に至るまで、パラメトリックな検討を実施しているが、当該シェルに、結合型不安定振動現象が発生したときには、周方向波数 $(n, n+1)$ のモード連成パターンでとなり、一方、振動数成分については、加振振動数成分 f に対して $f=f_n+f_{n+1}$ の関係を満たす場合が最も現われやすく、不整量が大きくなるにつれて、 $(n, n+2)$ 、 (n, n) といったモード連成パターンが現れてくるとの結果が得られている。このことから類推すれば、本結果では、ライナー円筒に与えた初期不整量は、板厚の3%とごく小さいため、 $(n, n+1)$ のモード連成パターン、即ち周方向波数6と7の振動モードが連成を起し、結合型不安定振動現象を起こしたことは明らかである。つまり、地震波の振動数成分に含まれる4.5Hzによってライナー円筒に共振現象が起こり、地震波のレベルが大きくなるにつれ、入力されてくる地震波のエネルギーを、もはやライナーの片持ち梁モードで吸収しきれなくなったとき、周方向波数6と

7のモード連成現象が発生すると同時に振幅のジャンプ現象が起こり、ライナー円筒が座屈に至ったものと考えられる。

(3) ライナー円筒に作用する流体圧分布

図-9にライナー円筒に作用する流体圧分布形状の例を示す。同図は、基準波×1.25水平の場合に関する結果の内、座屈発生前の時刻 $t=12.90\text{sec}$ 、座屈発生後の時刻 $t=19.20\text{sec}$ 時の時間断面をとったものである。座屈発生前の時刻 $t=12.90\text{sec}$ の場合には、流体圧分布形状は、円筒の周方向に波数1のモードをもった形状をしており、円筒軸方向については、Housner分布²³⁾のごとく自由液面にて圧力がゼロで、水深が深くなるにつれて圧力値が放物線状に増大していく傾向にあることがわかる。一方、座屈発生後の時刻 $t=19.20\text{sec}$ の場合には、円筒周方向の流体圧分布形状に、波数が2以上の高次モードが含まれていることが認められるが、全体的には波数1のモードが支配的であることがわかる。円筒軸方向については、自由液面位置から最大水深まで徐々に増加していく分布となっており、座屈前の分布形状と大きくは変わらない。いずれにせよ、実機相当のライナー円筒に作用する流体圧分布形状については、流体連成座屈の発生前後にかかわらず、円筒の周方向については波数1のモードが支配的であり、また、図-8と併せ見れば、外圧が作用する円筒部分に座屈変形が生じたことがわかる。この結果は、前報²⁾に示した二重円筒模型の場合と同様のものである。

以上、本章の検討から、地震動下におけるライナー円筒の基本的な流体連成座屈挙動を時刻歴応答解析から把握することができた。また、実機原子炉構造のような、複数流体領域を有する多重円筒構造の地震応答解析を実施する場合でも、本解析プログラムによれば、ライナー円筒の地震時流体連成座屈挙動を実用的な計算時間（本検討では、地震波20秒間、2000stepの計算で約1日）で実施することが可能であり、本解析プログラムによる直接シミュレーションは、実機の座屈挙動を詳細に理解する

ための解析手法として十分適用性を有していることを把握した。

3. まとめ

本報では、高速増殖炉炉壁冷却ライナーのごとく多重円筒シェルの地震時座屈耐力評価法の確立に資するため、実際の原子炉構造を想定した、ライナー構造を有する円筒容器の有限要素モデルを用いて、独自に開発した解析プログラムによる非線形時刻歴応答解析を実施した。

以上の検討から得られた知見は、以下のとおりである。

- (1)ライナー円筒の動的挙動に関し、地震波の最大入力加速度レベルに応じて、線形弾性応答範囲から、急激に応答が増大し、弾性座屈が発生することを数値的に確認した。
- (2)従来明らかでなかった、地震波入力下における円筒殻の過渡応答特性を数値解析的に把握した。本検討に用いた炉容器モデルでは、ライナー円筒の片持ち梁振動モードの約半分の2つの振動数成分が、ライナー円筒に大きな変位応答値をもたらした。それらの振動数成分が発生しはじめた時刻と、炉容器の応答が最大となる時刻は一致しておらず、前者は後者より2秒程度遅れていた。
- (3)本検討に用いた炉容器モデルでは、炉容器が片持ち梁振動モードで応答しながら、ライナー円筒に外圧座屈変形が生じ、変形形状は、円筒の周方向に波数6および7のモードが卓越したものであった。
- (4)水平動のみが作用した場合と水平動上下動同時作用の場合において、過渡応答波形や最大応答値等、ライナー円筒の座屈挙動にほとんど違いは見られなかった。
- (5)本解析プログラムによれば、従来の汎用構造解析プログラムでは計算量が膨大となり実質的に不可能であった地震時流体連成座屈解析（地震波20秒間、2000ステップの計算）を、十分実用的な時間で実施可能であり、実機の地震時座屈現象を詳細に把握するための解析手法として、本解析プログラムが適用できる見通しを得た。但し、本解析は、幾何学的非線形性を考慮した動的座屈解析にとどまっているため、今後は、より実際に即した検討に資するためには、材料非線形性も考慮した動的座屈解析を実施し、解析精度の検証を実施する必要がある。

参考文献

- 1)吉田聖一、河野和間、尾崎正彦、大橋亮：二重円筒石油タンクの設計試算報告、圧力技術第32巻第5号、1994,pp.23-35.
- 2)豊田幸宏、松浦真一：流体連成二重円筒殻の動的座屈挙動について、構造工学論文集Vol.44A,1998年3月,pp.247-256.
- 3)松浦真一ら：軸対称要素を用いた動的座屈解析コードの開発（その1）（その2）、電力中央研究所報告、U91060,1992, U93067, 1994
- 4)後藤大三、大矢弘史、小林信之：地震時における円筒タンク側板下部張出しについての一考察、圧力技術、Vol.18, No.4, 1980., pp.39-45.
- 5)W. K. Liu, "Finite Element Procedures for Fluid-Structure Interactions and Application to Liquid Storage Tanks," Nuclear Engineering and Design, 65,1981., pp.221-238.
- 6)R. Peek and M.Bkaily, "Postbuckling Behavior of Liquid Storage Tanks under Lateral Loads," Proceedings of the Pressure Vessels and Piping Conference, ASME PVP-Vol. 191, 1990., pp.37-45.
- 7)Haroun, M. A., Bhatia,H., "Numerical Simulation of Elephant-Foot Buckling of Seismically-Excited Steel Cylindrical Tanks," Proceedings of the Pressure Vessels and Piping Conference, ASME-PVP Vol. 355, July 1997.,pp.333-340.
- 8)F.G. Rammerstorfer, K. Scharf and F. D. Fischer: Dynamic fluid-structure-interaction and stability in storage tank design, Proceedings of the European Conference on Structural Dynamics, 1990.,pp.43-50.
- 9)A. Combesure : Static and Dynamic Buckling of Large Thin Shells, Nuclear Engineering and Design, Vol. 92,1986.,pp.339-354.
- 10)H. Hoell, A. Combesure and A. de Paulis,"Benchmark Study on Dynamic Buckling of a Hemispherical Shell," Transactions of the 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol.E,1993.8 ,pp.227-238.
- 11)A. Combesure : The Interest of Computation to Understand Dynamic Buckling Shear Experiments, Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol.F,1997.8,pp.21-32.
- 12)Ohtsubo, H., Nakamura, H., Matsuura, S. and Hagiwara, Y. : Elastic-Plastic Dynamic Buckling Analysis of FBR Main Vessels, Proceedings of the Pressure Vessels and Piping Conference, ASME PVP-Vol. 300, 1995., pp.129-136.
- 13)G. Michel, J.F. Jullien, A.Limam, N. Waeckel, A. Turbat, I. Politopoulos: Dynamic Buckling of Thin Cylindrical Shells under Shear Loading, Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol.F,1997.8,pp.69-76.
- 14)久田俊明、野口裕久、川上高、仲戸川哲人、田井浩一：原子炉格納容器の動的座屈の安全裕度に関する研究、日本機械学会論文集A編、59巻557号、1993.1,pp.203-210.
- 15)中村秀治：鋼製円筒橋脚の動的弾塑性座屈解析、土木学会論文集, No.549/I-37,1996.10.,pp.205-219.
- 16)後藤芳頌、王慶雲、高橋宣男、小畑誠：繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則、

- 土木学会論文集, No.591/I-43, 1998.4., pp.189-206.
- 17) 福山満由美、中川正紀、矢代毅、豊田幸宏、秋山宏；
高速増殖炉一次系機器の耐震座屈設計法に関する研究
(第1報、上部開放液中薄肉円筒の水平加振座屈実験)、日本機械学会論文集に投稿中
- 18) 豊田幸宏、松浦真一：流体連成動的座屈解析プログラムの開発とその検証、構造工学論文集, Vol. 43B, 1997年3月, pp.31-40.
- 19) S. Adachi, M. Ueta, F. Kudou, K. Sekine and H. Ozaki:
Structural Integrity of Reactor System for Top Entry Type
FBR, Transactions of the 12th International Conference on
Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. E,
1993., pp.1-11.
- 20) 松浦真一、中村秀治、小木曾誠太郎、大坪英臣：高速増殖炉の耐震座屈設計法に関する研究（第5報、座屈解析法の適用性評価）、日本機械学会論文集A編、61巻585号、1995., pp.138-146.
- 21) 土木学会鋼構造委員会編、座屈設計ガイドライン、昭和62年
- 22) M. Nakagawa, M. Fukuyama, K. Ishihama, H. Ikeuchi, Y. Hagiwara and H. Akiyama: Pseudo-dynamic buckling experiments on thin cylindrical shells under biaxial seismic loads, Nuclear Engineering and Design, Vol.157, 1995., pp.27-36.
- 23) G.W. Housner: Dynamic pressures on accelerated fluid containers, Bull. Seim. Soc. Am., Vol. 47, 1957., pp.15-35.
- 24) K. Tukimori, W.K. Liu, Y.H. Tsao and R.A. Uras; Dynamic stability characteristics of fluid-filled shells under multiple excitations, Nuclear Engineering and Design 142, 1993. pp.299-318.

(1998年9月18日受付)