

スーパーコンピュータによる物理現象シミュレーション

地震時の高速炉容器内液面揺動現象の解析

Numerical Simulation of Sloshing Behavior in the Fast Breeder Reactor Caused by the Seismic Force

自由液面を持つ流体機械が、地震その他の外力で加振されると自由液面が揺動し、それに伴って構造物に応力が加わる。この自由液面の揺動現象と構造物の応力を解析できるプログラムを開発した。このプログラムでは、自由液面を持つ流れの解析に境界要素法を、構造物の変形解析には有限要素法を適用し、流体と構造物の方程式を境界面上で結合することにより、流体と構造の連成解析を可能とした。

スーパーコンピュータHITAC S-820を用いた大規模な数値シミュレーションにより、地震時での高速炉内の冷却材揺動現象を解析した。

天野 研* *Ken Amano*
山川正剛* *Masanori Yamakawa*
内藤正則** *Masanori Naitō*

1 緒 言

現在、原子炉の設計で数値シミュレーションはさまざまな設計段階で活用されているが、従来の計算機的能力では解析できない複雑な現象も多く存在する。熱流動設計に例をとると、自由液面を持つ流れ、流体と構造の連成振動現象、固相と液相の相変化を含む溶融凝固現象などは現在でも解析の難しい現象である。従来は、これらの複雑で複合的な現象に対して、おのこのの体系に応じた模型実験によって設計に必要な情報を得ていた。一方、製品の開発期間の短縮や開発費の削減の観点から、数値シミュレーションによってこれらの現象を解析できる技術が強く望まれている。

スーパーコンピュータの登場により、これらの複合的な物理現象を数値シミュレーションすることが可能になりつつある。

本稿では、高速炉を対象として、自由液面問題と流体-構造連成問題の数値解析技術、およびHITAC S-820を用いた物理現象の数値シミュレーションの一例について述べる。

2 解析技術の概要

2.1 高速炉での自由液面の揺動現象

高速炉は天然ウラン中の ^{238}U を、効率よく核燃料物質プルトニウムに転換できる原子炉である。高速炉の概観を図1に示す。原子炉容器内には、炉心、炉心上部構造物、中間熱交換器、ポンプなどが備えられており、これらが液体ナトリウム

中に浸されている。液体ナトリウムは炉心から熱を取り出す作動流体で、上面に自由液面を持っており、その上部はカバーガスと呼ばれる不活性ガスで覆われている。

わが国が地震国であることから、地震時での原子炉の応力評価は重要な課題である。高速炉容器のように液体の入った

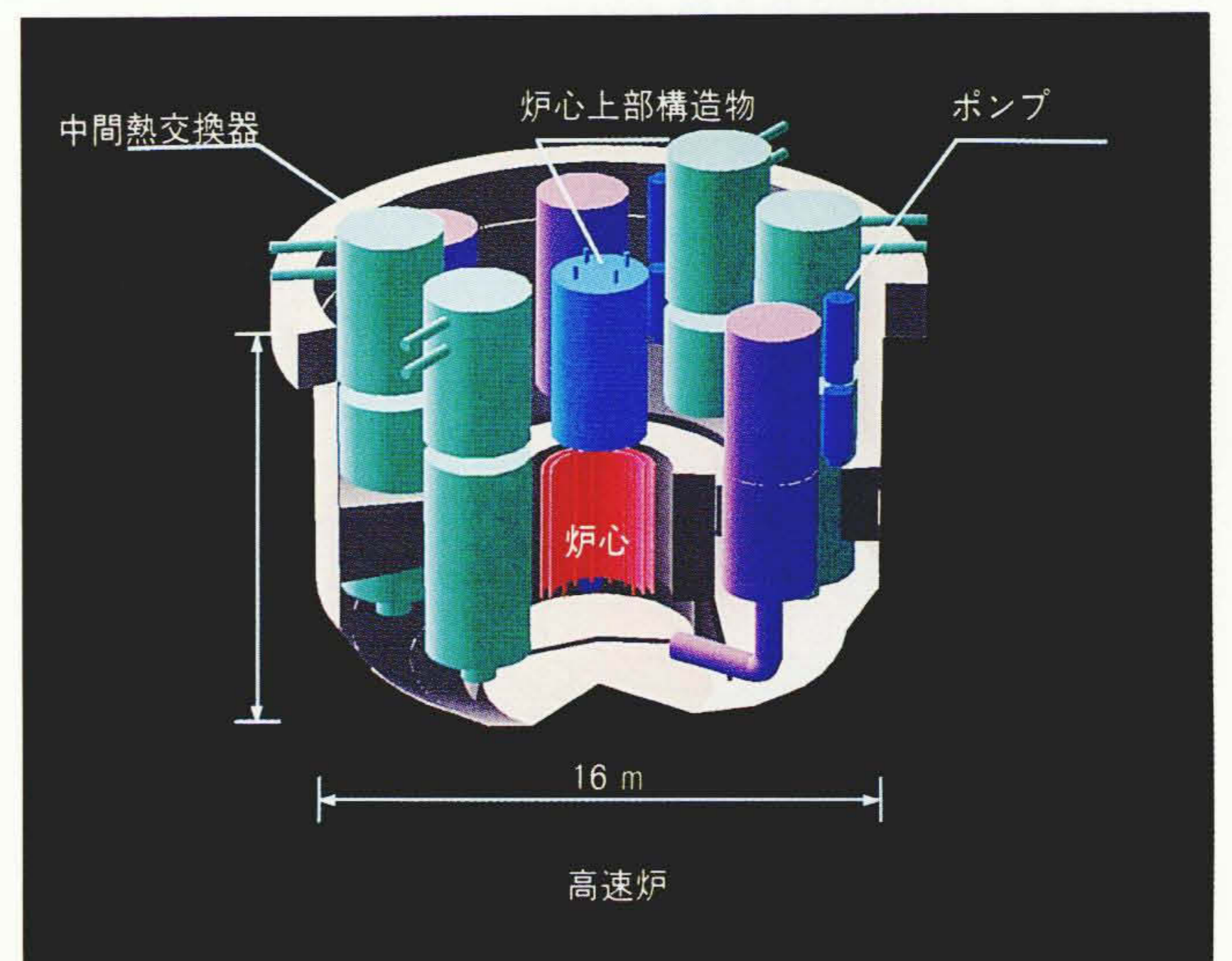


図1 高速炉の概観図 原子炉容器内には、炉心、炉心上部構造物、中間熱交換器、ポンプなどが備えられており、これらが液体ナトリウム中に浸されている。

* 日立製作所 エネルギー研究所 ** 日立製作所 エネルギー研究所 工学博士

容器が地震によって加振されると、本来の加振力のほかに流体の液面が揺動し、容器壁に流体力が加わるという現象が現れる。この液面の揺動現象をスロッシングと呼ぶ。内部構造物を持つ容器内の液面の運動は一般に複雑であり、従来の計算機では多大の計算時間を要する解析の困難な問題の一つである。以下には、スーパーコンピュータを用いて、自由液面の揺動を数値シミュレーションで再現し、流体力を評価するとともに、流体-構造連成解析によって構造材の応力を評価する技術について述べる。

2.2 解析モデルの概要

ここでは、自由液面を持つ流れ場をポテンシャル流れとして扱う。解析体系のモデルを図2に示す。解くべき方程式として、流体の運動方程式、液面の運動方程式および流体の質量保存式がある。流体の運動方程式に相当するのは、図3の(1)式に示す速度ポテンシャル ϕ についてのBernoulliの方程式である。基準の高さから液面までの高さを表す液位 η を導入して液面の形状を記述する。液面の運動方程式は、同図の(2)式で与えられる。質量保存式は(3)式、すなわち速度ポテンシャルについてのLaplace方程式で与えられる。流れの速度ベクトルは、速度ポテンシャルの空間的微分によって得られる。

以上の三つの方程式を連立して解くことによって、任意の時刻での速度ポテンシャル、速度ベクトルおよび液面形状が求められる。

このプログラムでは、(3)式のLaplace方程式の解法に境界要素法を用いた²⁾。境界要素法には、次のような利点がある。

(1) 解析領域を流体の境界面に限定できる。すなわち、計算用の格子点を自由液面および流体と構造物の境界面にだけ設ければよく、流体内部を格子分割する必要がない。これは、高速炉のように多数の内部構造物のある体系を三次元で解く場合にきわめて有利となる。

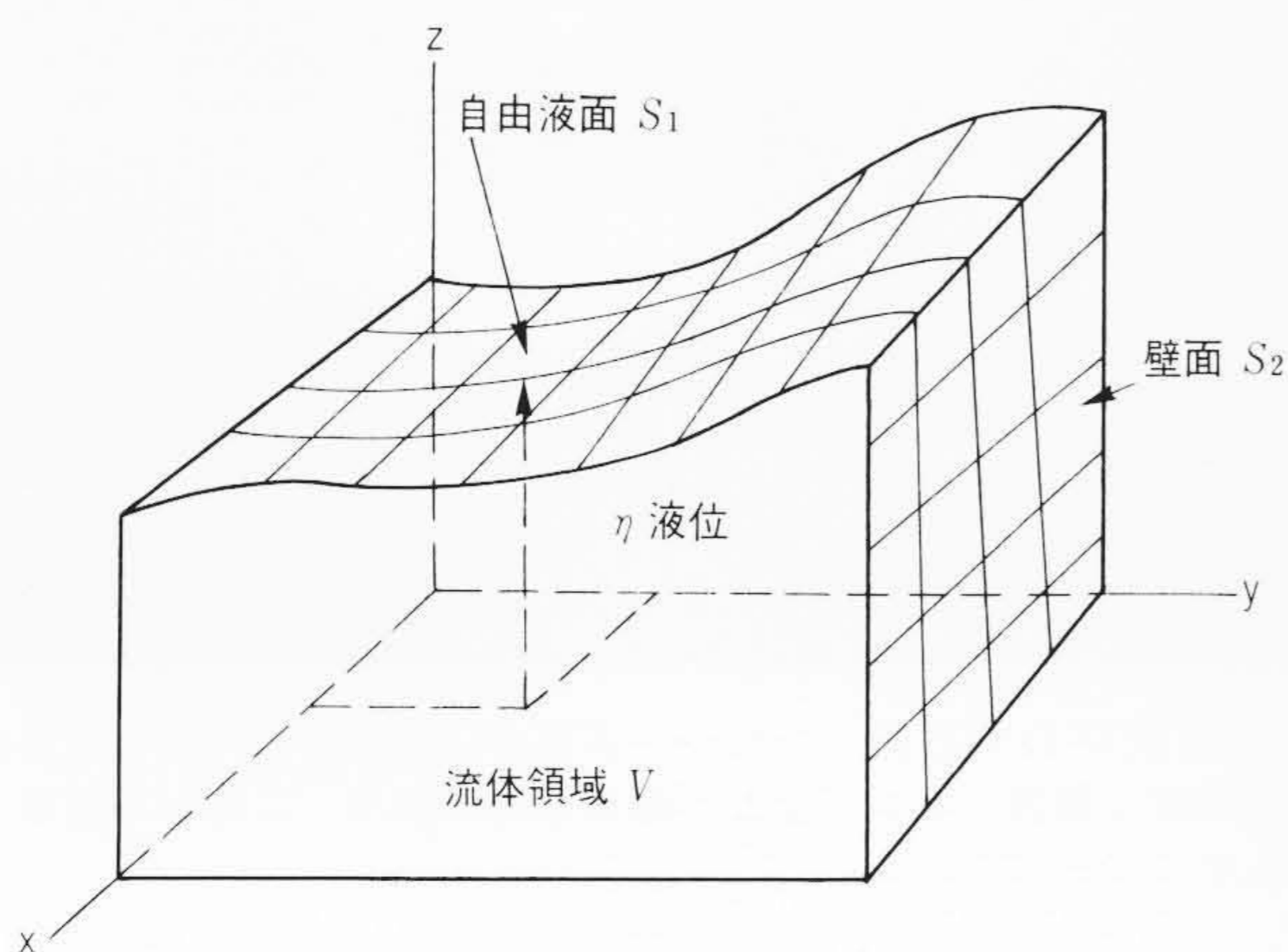


図2 解析体系のモデル 自由液面および壁面だけで格子分割する。基準高さから液面までの高さを表す液位 η を導入し、これにより液面の形状を表現する。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi - \frac{P_0}{\rho} - g\eta \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -U_x \frac{\partial \eta}{\partial x} - U_y \frac{\partial \eta}{\partial y} + U_z \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに

- ϕ : 速度ポテンシャル P_0 : 大気圧
- g : 重力加速度 ρ : 密度
- η : 液位 U_x, U_y, U_z : 流速

図3 基礎式 Bernoulliの方程式、液面の運動方程式および速度ポテンシャルのLaplace方程式を与える。

(2) 計算された液位を用いて、自由液面上の格子点の座標位置を更新することにより、液面の運動とともに格子点を移動できる。これによると、差分法で一般に用いられている固定格子点に比べて液面形状が高精度で求まり、かつその表示が容易となる。

(3) 流体側に境界要素法を用い、構造側には有限要素法のシェルモデルを用いることにより、境界面上で両者を容易に結合でき、流体-構造連成解析が可能となる。

この解析モデルの基礎式には、図3の(1)式中の右辺第1項や(2)式中の右辺第1, 2項のように、流体力学での非線形効果を与える項が含まれている。これらの項は、液面が大きく変形する場合には重要となる。この点で、従来の液面振動解析での線形モード解析や、流力振動解析での付加質量モデルと本質的に異なっている。

構造物に対しては弾性体の方程式を適用し、有限要素法を用いて解く。構造物が大きく変形する場合を考慮して、有限要素には構造物の大変形を取り扱える厚肉シェル要素を用いている。ただし、塑性変形までは解析対象にしていない。

流体の方程式を解いて得られる圧力を、構造物の弾性体方程式に与えて構造物の変位と変形速度を計算する。構造物の変形速度は、流体と構造物の境界面での流速の境界条件となる。これを速度ポテンシャルのLaplace方程式の境界条件として用いることにより、流体と構造を連成して解くことができる。

2.3 解析例

高速炉の縮尺模型を用いたスロッシング実験の解析例³⁾により、このプログラムの機能を具体的に説明する。解析モデルを図4に示す。解析モデルは、流体の入った円筒状の炉容器内に、中間熱交換器やポンプなど円筒状の内部構造物が配置されている。内部構造物は天井(ルーフスラブ)からつり下げられており、下端は水中にあって自由端となっている。同図

では天井と炉容器壁を取り去り、内部構造を示している。解析モデルの炉容器の直径は2.23 m、高さは1 m、水深は0.73 mとし、構造物は厚さ20 mmの亚克力である。

この解析体系に用いた計算格子を図5に示す。流体と構造物はおのこの独立に格子分割される。流体の格子点数は1,360点、構造物の格子点数は3,750点である。

流体には境界要素法を用いるため、格子点は表面にだけ生成される。格子点は構造物の形状を型どり、自由液面上に見える孔は内部構造物に対応している。構造物はすべて有限要素法の厚肉シェル要素を用いて格子分割される。この解析モデルでは、内部構造物は中空円筒でモデル化されている。ただし、各シェル要素について肉厚と剛性を任意に与えることができるので、スラブ状構造物に対してもモデル化は可能である。

数値解析では、格子点上に設定された離散的な変数を用いて大規模な連立一次方程式(行列方程式)を解く。この手法で大きな記憶容量を占める行列は、Laplace方程式を離散化して得られる係数マトリックスと、弾性体方程式を離散化して得られる剛性マトリックスである。境界要素法を用いる場合、係数マトリックスは格子点数の二乗の成分を持つ密マトリックスとなる。また、弾性体の剛性マトリックスは対角成分の周りに帯状に成分を持つバンドマトリックスとなる。三次元の問題では、剛性マトリックスのバンド幅はかなり大きくなる。

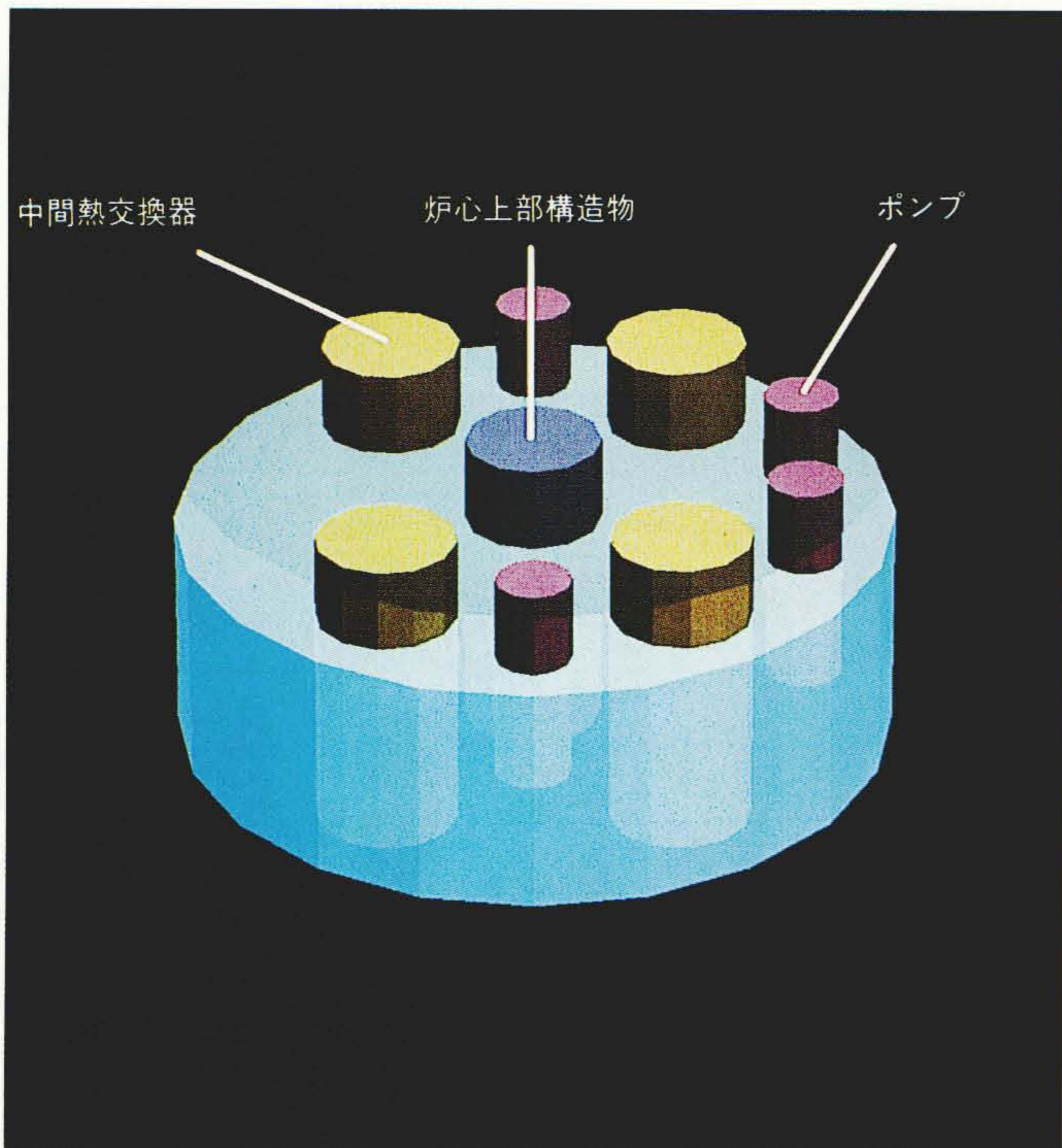
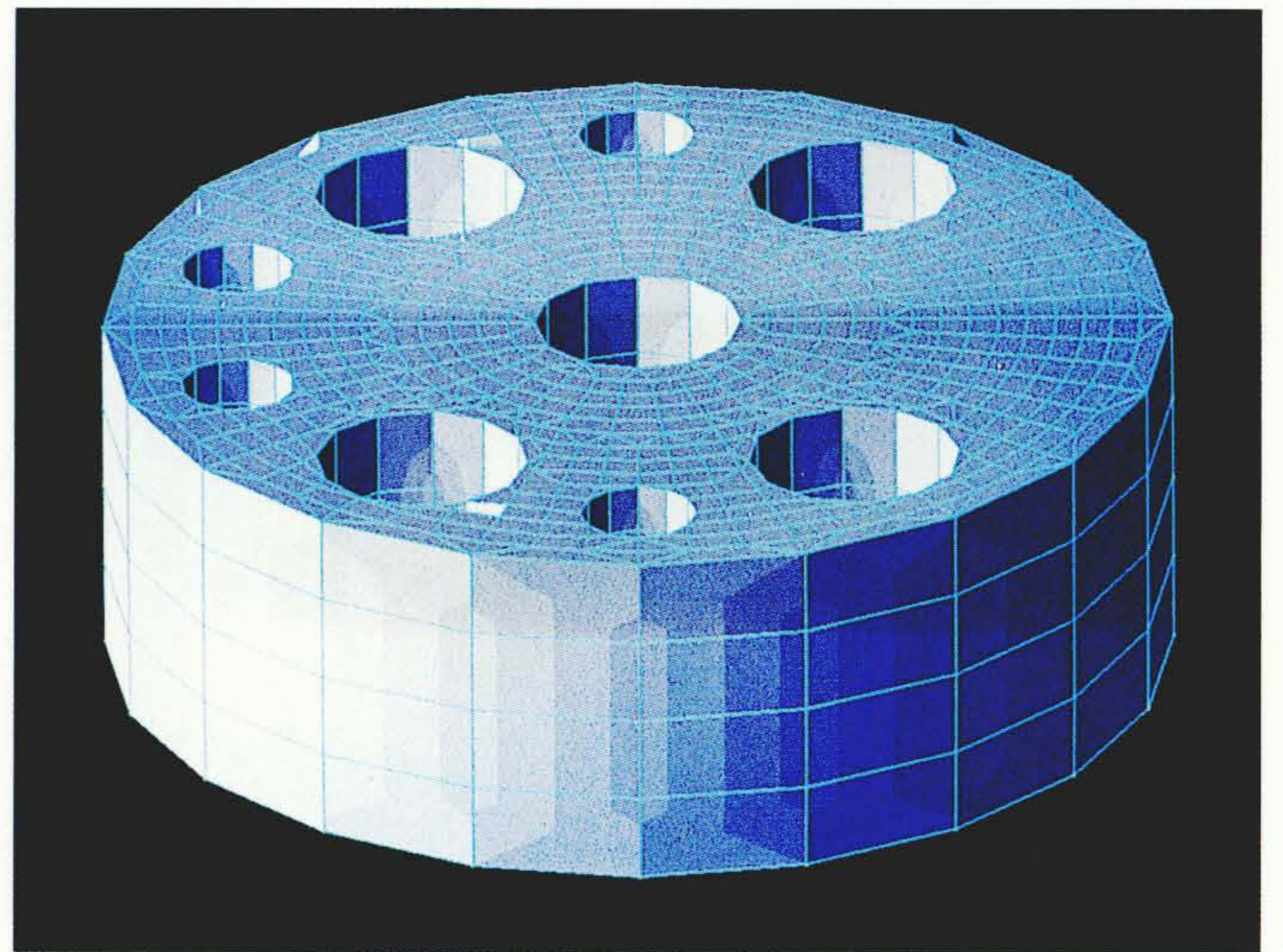
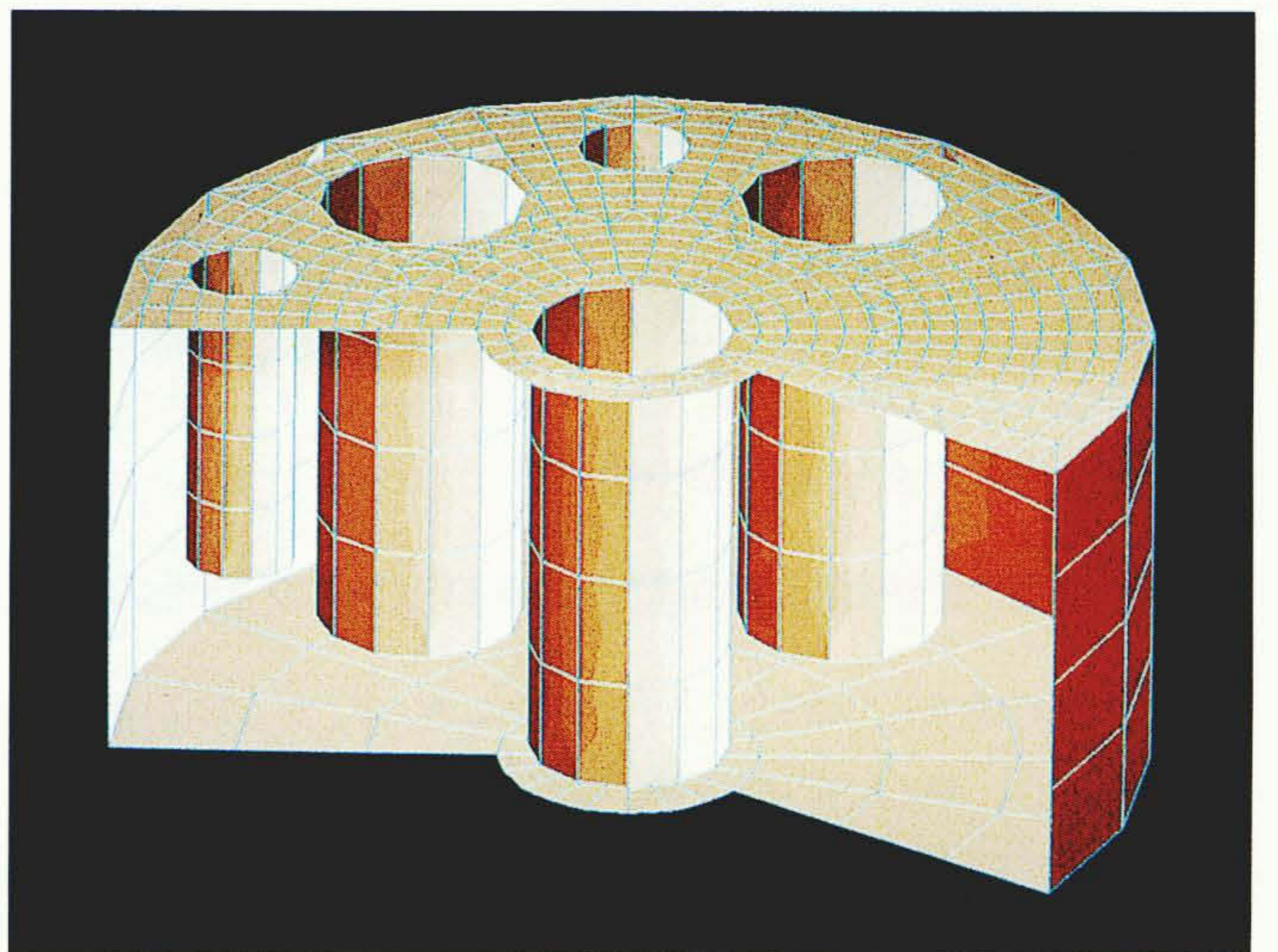


図4 高速炉モデルの解析体系 炉容器と炉内構造物を円筒容器でモデリングする。炉内構造物は天井(ルーフスラブ)からつり下げられているが、天井は図中に示されていない。



(a) 流体の計算格子点(1,360点)



(b) 構造物の計算格子点(3,750点)

図5 解析領域の格子分割 流体と構造物は、おのこの独立に格子分割される。自由液面上に見える孔は、内部構造物に対応する。

流体と構造の両者に対して非線形のモデルを用いるため、形状の変化に応じてマトリックスの反復計算が必要である。このような大規模な計算を実行するために、スーパーコンピュータの利用は不可欠となる。

この解析体系に周波数1 Hzの正弦波水平加振力を加えたときの自由液面の運動の一例を図6に示す。また、実験で求められた三つの共振モードについて、液面振幅の計算例を図7に示す。図6に示した波形は二次の共振モードに相当する。解析により三次モードまでの波形が再現できている。さらに高次のモードまで解析するためには、より細かな格子分割が必要となる。実験では求められていないが、約100 cm/s²の加速度を加え、自由液面が天井に衝突したときの、流体面上の全圧力分布と構造物の変位を図8に示す。流体解析から得られる流体の圧力は、構造物に加わる流体力となる。流体の液

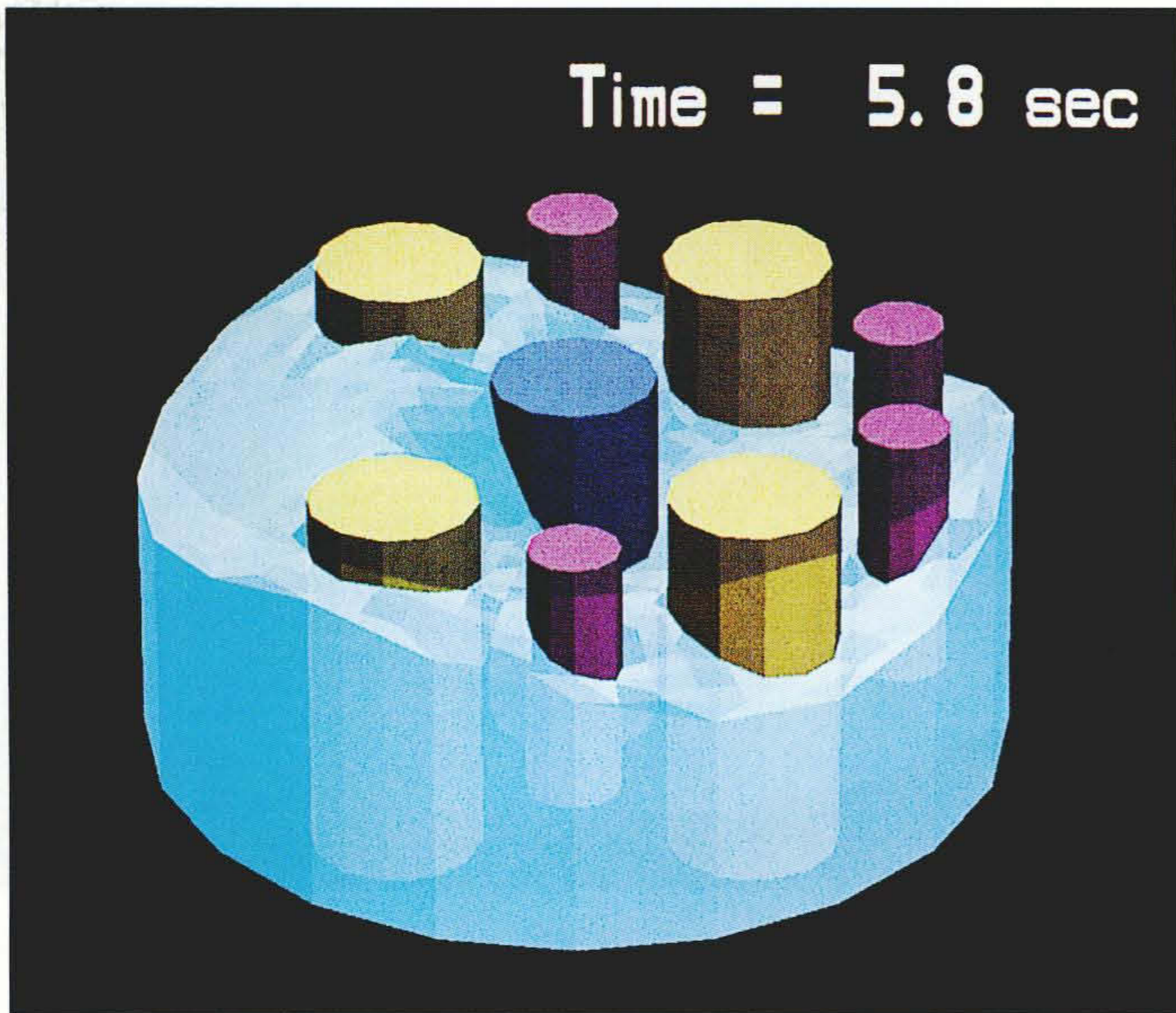


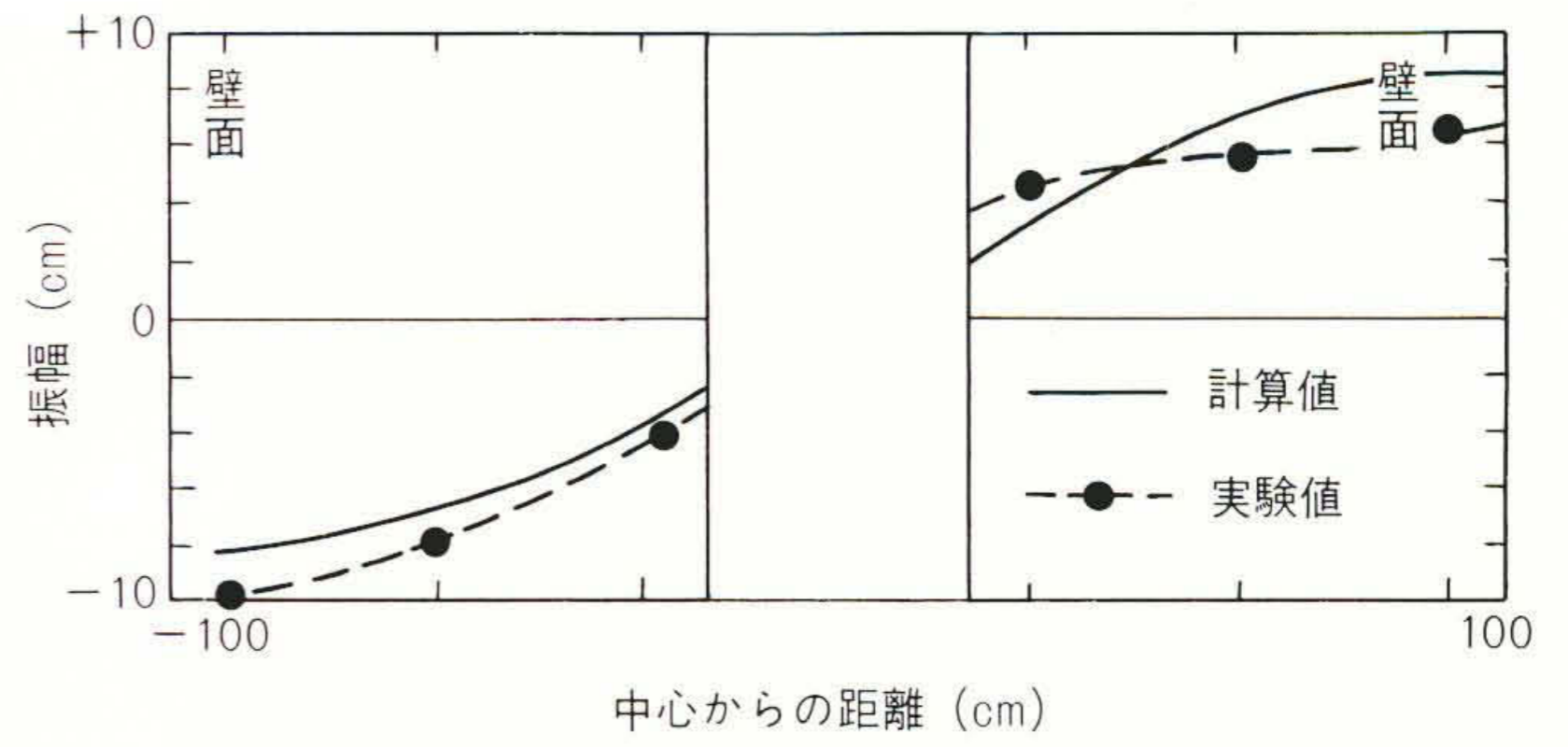
図6 高速炉模型のスロッシング現象のシミュレーション 周波数1 Hzの水平正弦波加速度を加えたときの液面運動の一例を示す。時間は加振開始後5.8秒である。

面揺動の大きさに比べて構造物の変位量は最大で1.19 mmと小さい。図8の変位は実際の変位を100倍に拡大している。

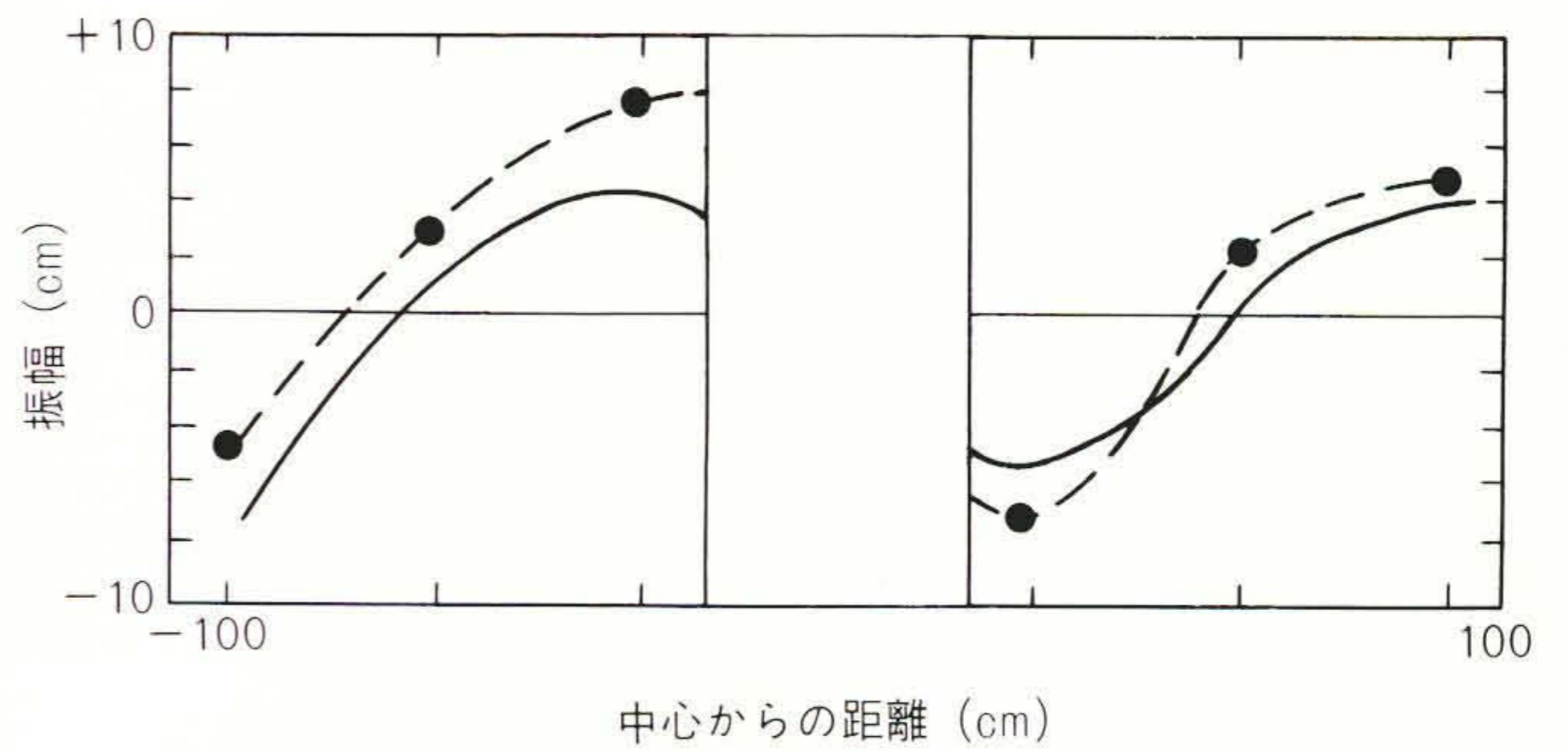
3 一液面型炉と多液面型炉のスロッシング特性の比較

高速炉の構成上の概念としてすでに述べたように、炉容器の中に炉心、炉心上部構造物、中間熱交換器、ポンプなどを収めた一液面型炉と、炉容器内に炉心と炉心上部構造物だけを取り、中間熱交換器とポンプを別々の容器に収めた多液面型炉がある。

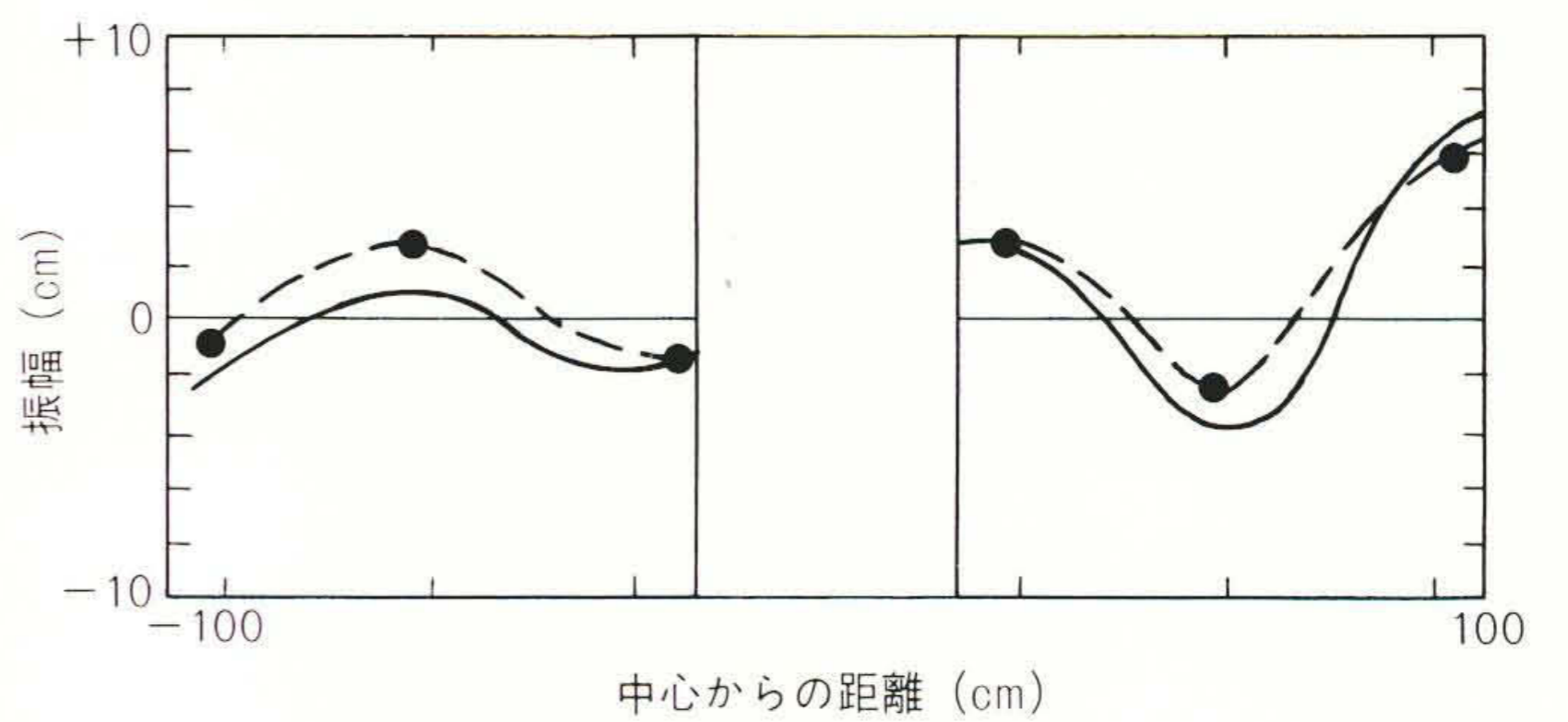
地震時の原子炉の応答特性の観点から、単一の液面を持つ



(a) 一次共振モード $f=0.53$ Hz

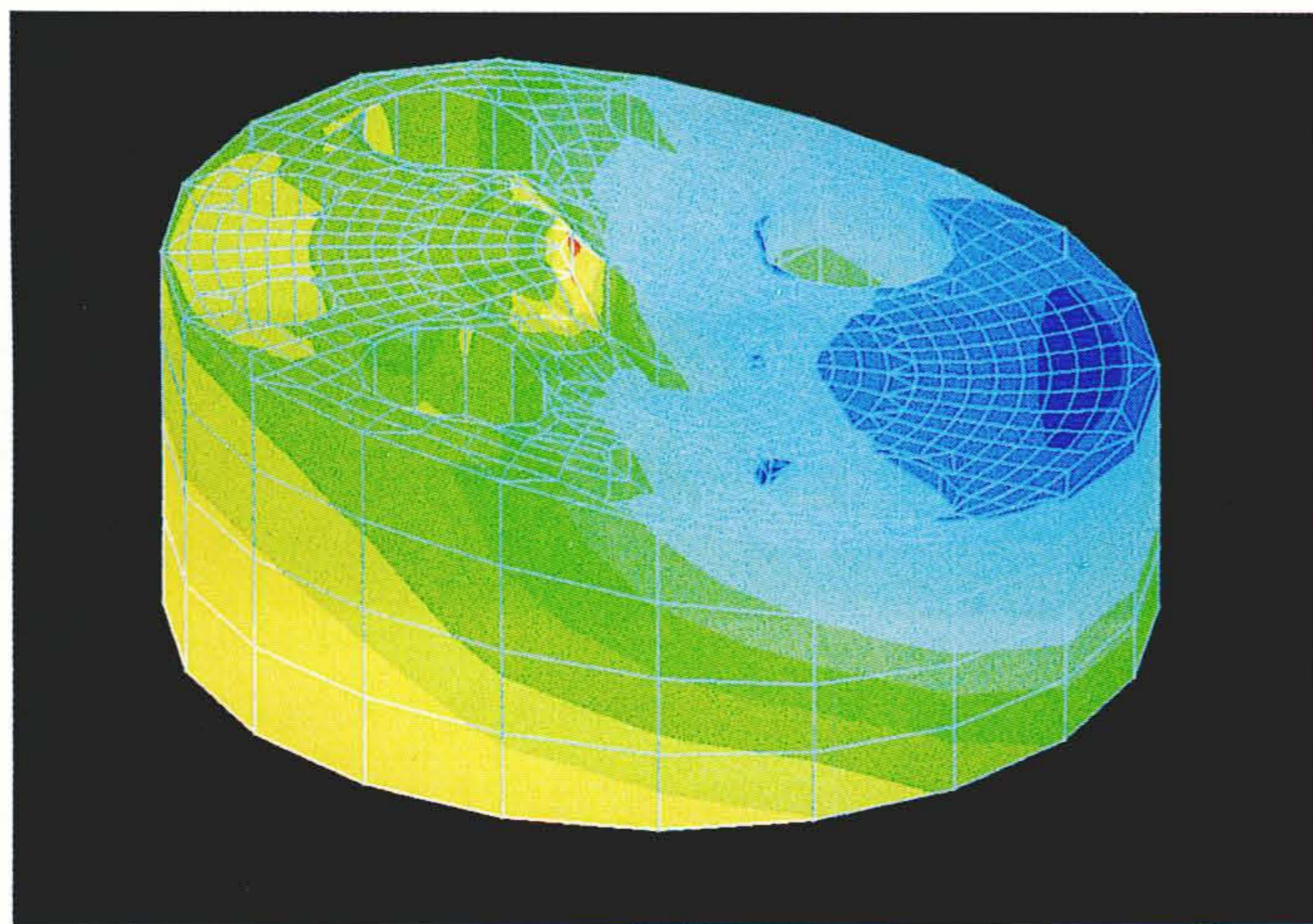


(b) 二次共振モード $f=1.01$ Hz

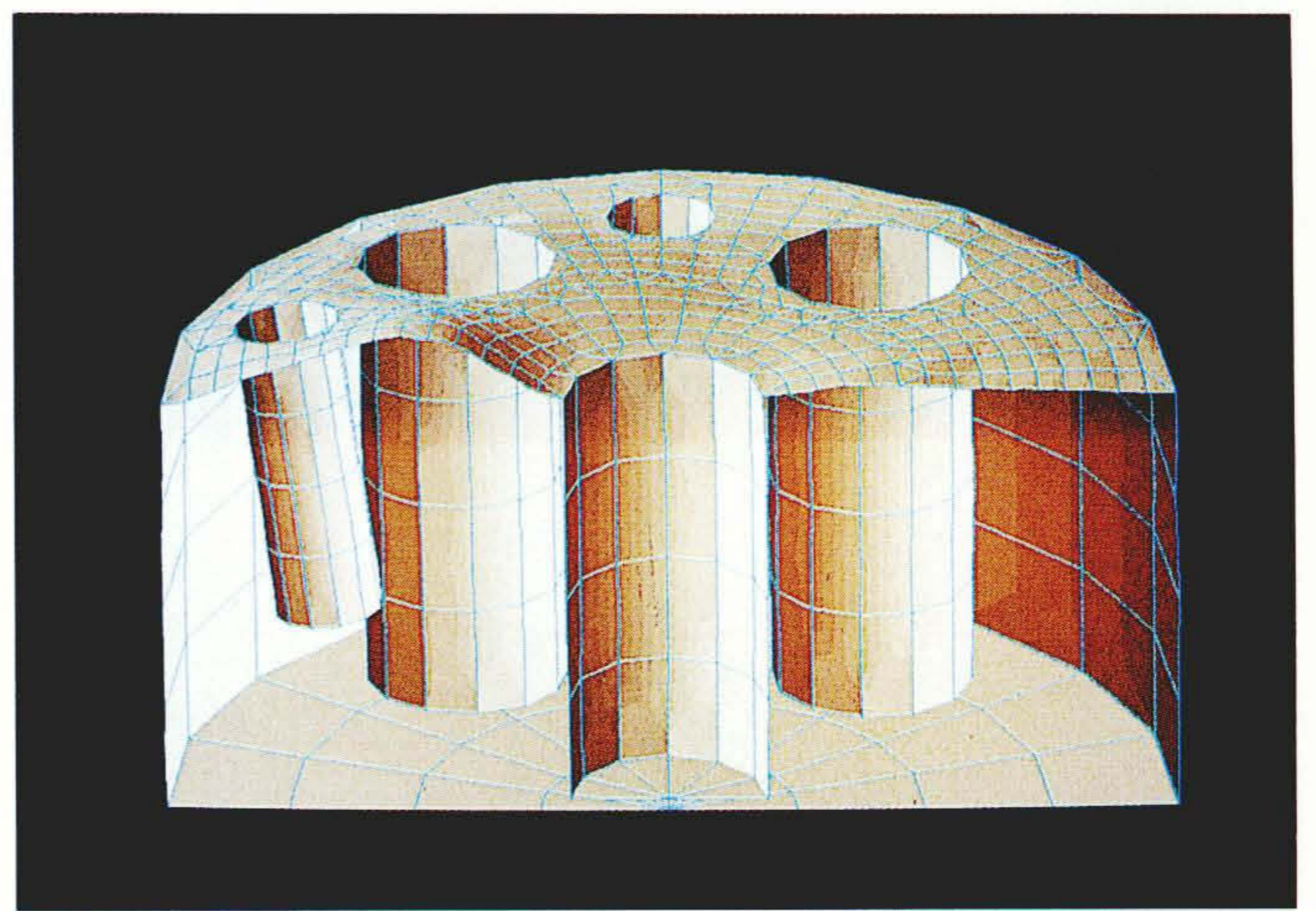


(c) 三次共振モード $f=1.34$ Hz

図7 共振周波数での液面モード 容器の直径を通る縦断面での液位の測定値と解析による液面モードを示す。一次～三次までの共振モード波形が計算によって求められている。



(a) 流体表面の圧力分布



(b) 構造物の変位(変位は100倍に拡大して表示)

図8 天井衝突時の液面の圧力分布と構造物の変位 液面は左上部の天井へ衝突している。流体解析から得られた圧力は構造物に加わる流体力となり、構造物は(b)図のように変形する。構造物の変位は100倍に拡大して表示している。

一液面型炉と複数の液面を持つ多液面型炉のスロッシング特性の差に興味を持たれる。この解析プログラムによって両者のスロッシング特性を比較した。

電気出力1,000 MWクラスの大型炉を想定して、一液面型炉の炉容器の直径を約16 mとした。多液面型炉は、直径が約10 mの炉容器内に炉心上部構造だけを備え、周囲に中間熱交換器を収納した容器2基を配置したモデルとした。これらの解析モデルは、単一液面体系と多液面体系のスロッシング特性の基本的な差異を見ることを目的としている。

両体系に対して、次式で与えられる正弦波水平加振力を3波加えた。

$$Ax = X_0 \omega^2 \sin \omega t$$

ここに周波数 ω は、液面振動の線形固有値解析によって得られた共振周波数である。おのおのの周波数に対して速度振幅 $X_0 \omega$ が50 cm/s(一定値)となるように加振振幅 X_0 を定めた。速度振幅を一定とすることは、1波当たりの入力エネルギーが等しい条件となる。加振方向は、多液面型炉については、3液面が直線上に並ぶ長手方向にとる。これは長手方向からの加振が最も大きな液面振動を生じることによる。一液面型炉では、容器内の機器配置がおおむね対称であるため、ポンプと炉心上部構造が直線上に並ぶ方向を加振方向として任意に選んだ。

以下には、一液面型炉の共振モードの中から0.09 Hzと0.24 Hzを、多液面型炉の共振モードの中から0.03 Hzと0.32 Hzを選んで過渡解析した結果を示す。0.09 Hzと0.03 Hzのモードは、両炉型の最も低い共振周波数のモードである。0.24 Hzと0.32 Hzのモードは過渡解析の結果、液面が最も大きく振動したモードである。

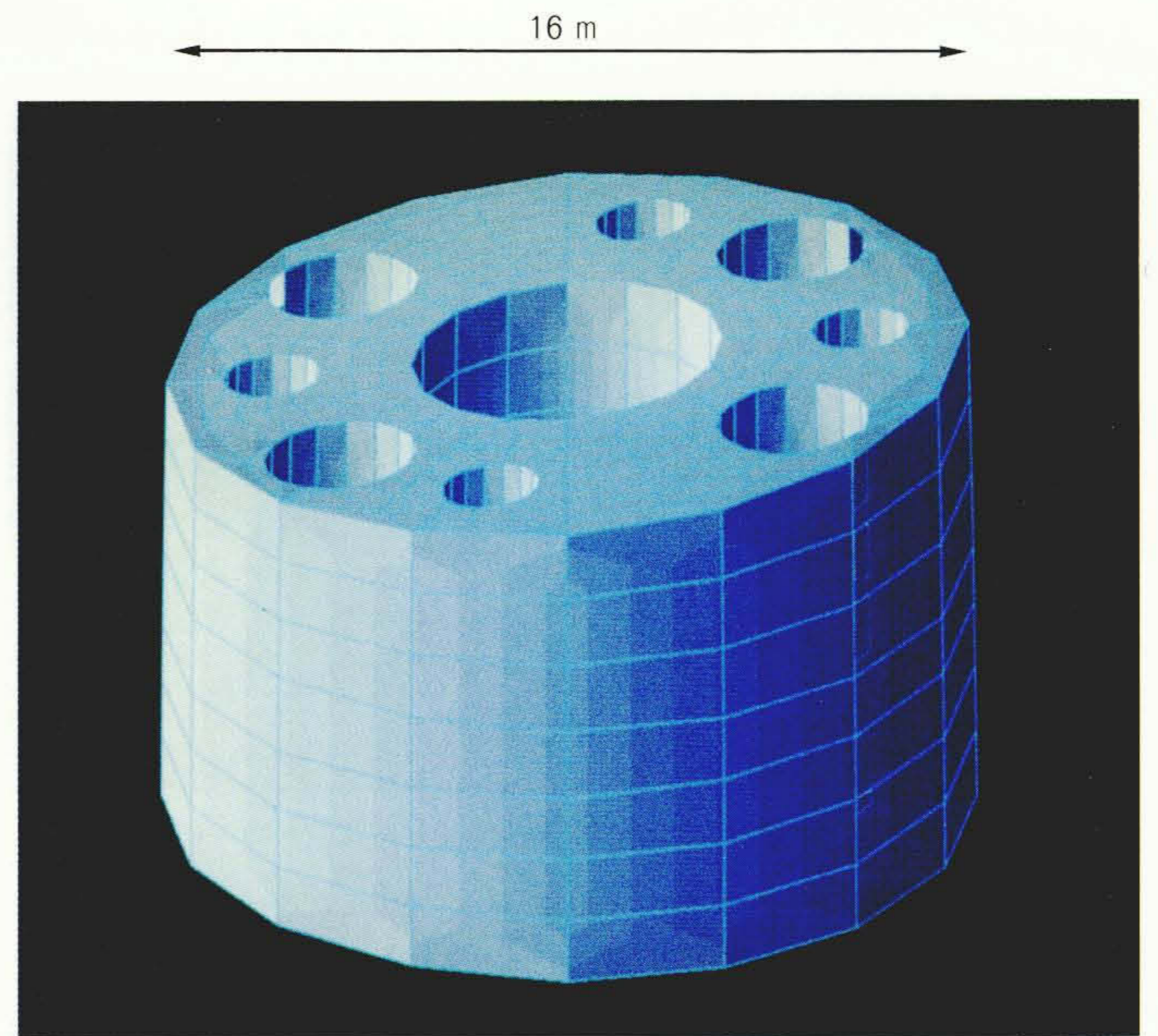
(1) 一液面型炉のスロッシング特性

一液面型炉の最も低い共振周波数0.09 Hzの振動モードを図9(a)に示す。ほとんど平面的な傾きを持つ液面形状となり、液面の振幅も最大で27 cm程度と小さい。これに対して同図(b)に示す0.24 Hzのモードは、炉容器内の液面が最も大きく振動するモードである。振動モードは、炉容器の直径を半波長とする正弦波モードに近い。液面の振幅は最大約4 mとなる。

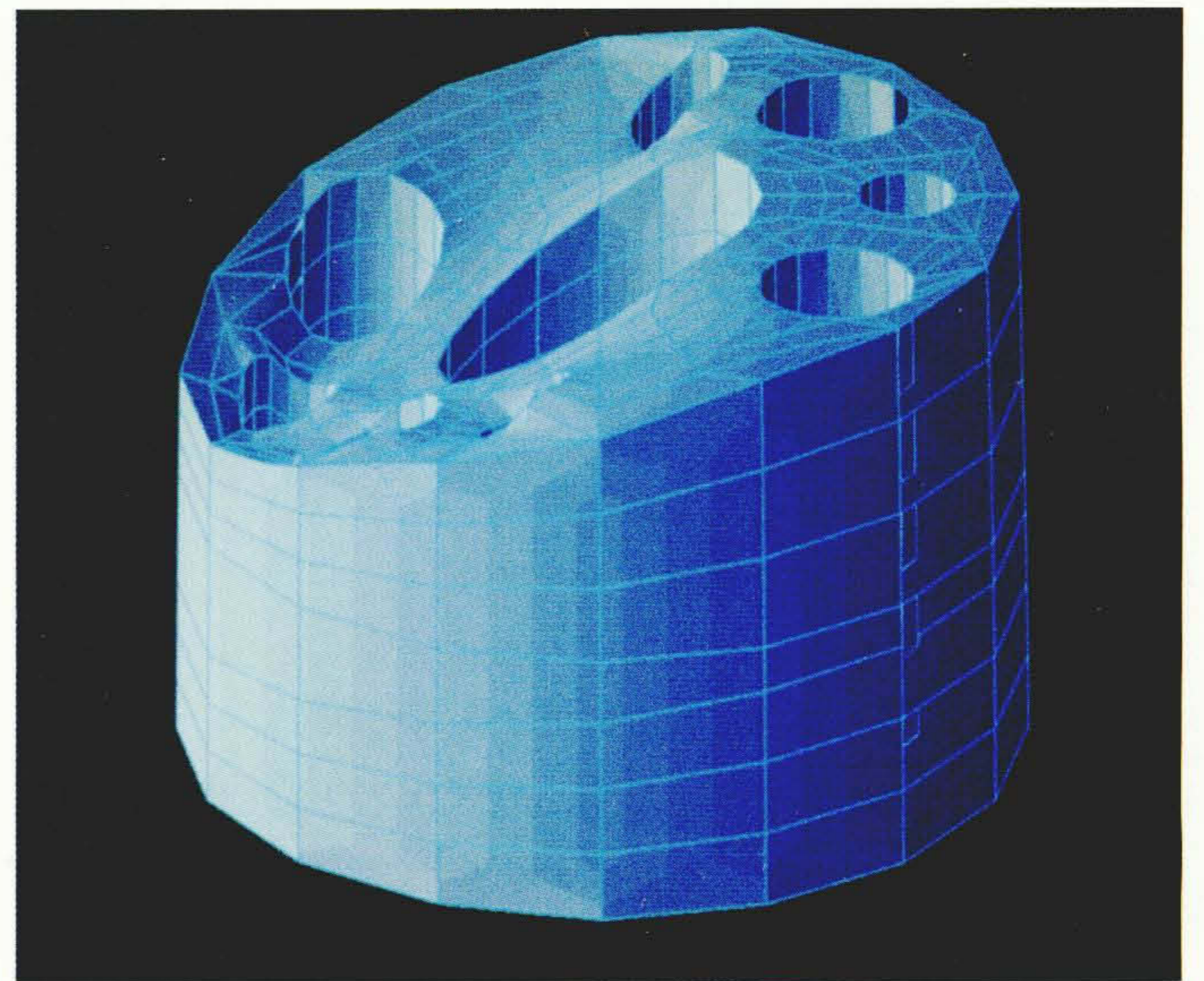
(2) 多液面型炉のスロッシング特性

周波数0.03 Hzのモードは多液面型炉に特徴的な振動モードである。すなわち、図10(a)に示すように、炉容器内では液面の変動がほとんどなく、二つの熱交換器間でU字管振動をする。炉容器内では振幅10 cm程度の振動しかしない。熱交換器の容器内では、約50 cmの振幅で振動する。同図(a)の写真は変位を5倍に拡大している。二つの熱交換器間では液面の振動モードは180度位相がずれている。

一方、0.32 Hzのモードは一液面型炉の0.24 Hzのモードと同様に、炉容器内の最も大きい共振モードである。図10(b)に示すように炉容器内で大きく液面が振動するが、熱交換器内



(a) 0.09 Hz振動モード



(b) 0.24 Hz振動モード

図9 一液面型炉のスロッシングモード 共振周波数0.09 Hzおよび0.24 Hzでの、一液面型炉の液面振動モードである。

の液面の振幅は炉容器側の $\frac{1}{5}$ 程度である。炉容器内では振幅は最大3 mとなる。

ところで、一液面型炉の炉容器の直径と多液面型炉の炉容器の直径を代表長さにとると、

$$(\text{一液面型炉の直径}) \times (0.24 \text{ Hz})^2$$

$$\approx (\text{多液面型炉の直径}) \times (0.32 \text{ Hz})^2$$

が成り立つ。これは一液面型炉の0.24 Hzのモードと多液面型炉の0.32 Hzのモードとが流体力学的に相似であることを意味する。したがって、多液面型炉の0.32 Hzの共振モードは、おおむね炉容器の大きさに依存して決まり、周辺の熱交換器の影響は小さいと推測できる。

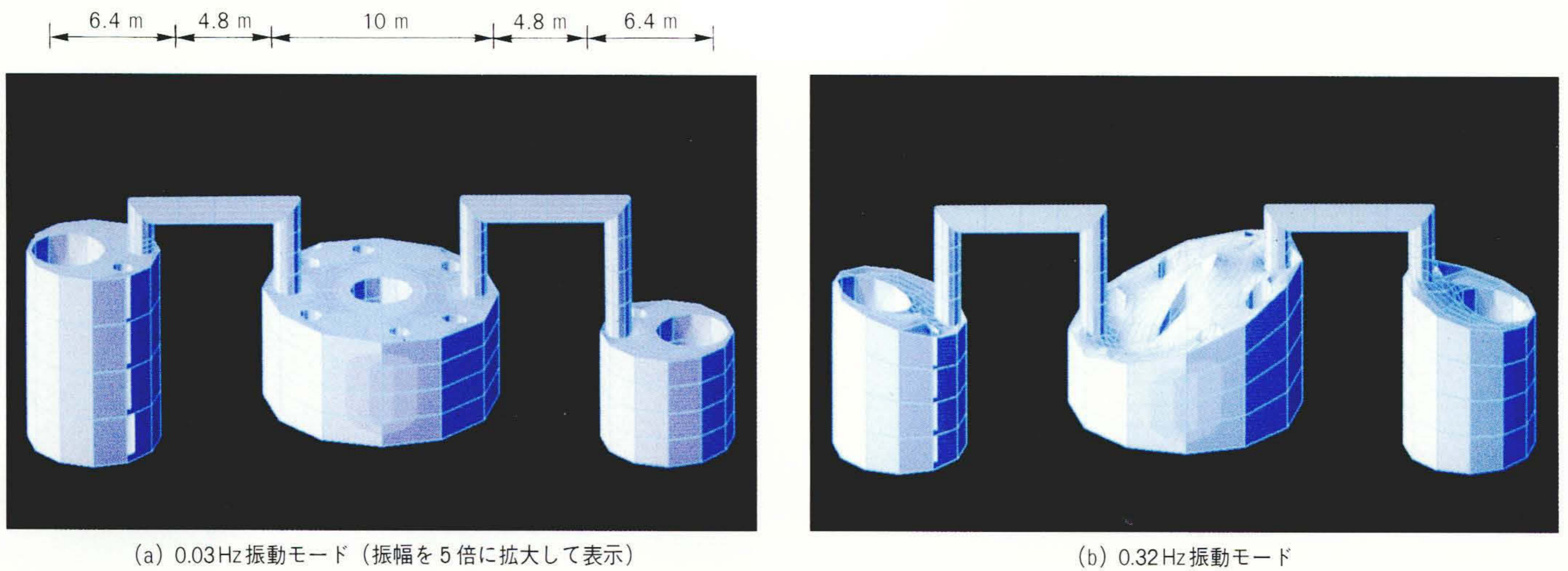


図10 多液面型炉のスロッシングモード 共振周波数0.03 Hzおよび0.32 Hzでの、多液面型炉の液面振動モードである。

以上のように、一液面型炉と多液面型炉のスロッシング特性を比較すると、多液面型炉には約30秒の長周期のU字管振動モードが存在することがわかる。このような長周期の振動モードは一液面型炉には見られない。また、液面が大きく振動するモードの周波数は、おおむね炉容器の直径から決まり、多液面型炉の周辺に配置された熱交換器からの影響は小さいことがわかる。

4 結 言

地震時の高速炉内での冷却材の液面振動現象と、これに伴う構造物の変形および応力を解析できる数値シミュレーションプログラムについて述べた。このプログラムでは流れ場をポテンシャル流れとし、境界要素法を用いて解く。自由液面上の格子点は液面の変形とともに運動し、大きく変形する液面を解析できる。あわせて、構造物を大変形可能なシェルモデルを用いて有限要素法で定式化した。以上の流体と構造物の方程式を境界面上で結合することにより、流体-構造連成解

析を可能とした。

HITAC S-820を用いた大規模な数値シミュレーションにより、一液面型高速炉と多液面型高速炉の二つの炉型について、地震時のスロッシング特性を解析した。その結果、両炉型とも液面が大きく振動するモードの周波数は炉容器の大きさからおおむね決定できることや、多液面型炉には長周期のU字管振動モードが存在することがわかった。

このプログラムは、原子炉のほか、石油タンクや化学プラント機器などの自由液面を持つ流体機械の設計にも適用できる。

参考文献

- 1) 天野, 外: 境界要素法による三次元スロッシング解析, 日本機械学会論文集B編, 56巻, 523号, 684(1990-3)
- 2) 宇多村, 外: 境界要素法によるポテンシャル場の三次元解析, 日立評論, 67, 6, 471~476(昭60-6)
- 3) 天野, 外: 日本機械学会第67期講演会予稿集, No.1117 (1990-3)