

タンク型高速増殖炉原子炉構造の耐震評価

Seismic Evaluations of Reactor Structure for Tank-type Fast Breeder Reactor

タンク型高速増殖炉は、炉心を直接冷却する一次系ナトリウムとポンプ、中間熱交換器などの一次系機器を直径、深さ共約20mの原子炉容器に収納する形式のものである。このタンク型炉は運転時の圧力が低いために、原子炉容器が大型薄肉シェルとなることが構造的特徴であり、また、そのために原子炉構造の耐震健全性評価手法の開発が主要な技術課題の一つと考えられる。本報告はタンク型高速増殖炉の耐震設計を行なうための地震応答解析手法、及び座屈挙動評価手法の開発状況について述べる。

また、これらの評価手法をタンク型高速増殖炉の原子炉構造に適用した結果、我が国の厳しい耐震設計条件下でも同構造が成立する見通しを得たことについて述べる。

重田 政之* Masayuki Shigeta
小久保邦雄** Kunio Kokubo
中川 正紀** Masaki Nakagawa
園田 吉隆*** Yoshitaka Sonoda

1 緒 言

タンク型高速増殖炉は、一次系ナトリウム及び一次系機器を原子炉容器に収納する形式であるため、ループ型炉に比較してコンパクトな構造とすることが可能である。また、そのためにタンク型炉の原子炉構造は大型の薄肉シェル構造となり、我が国の耐震設計条件下では耐震成立性の評価が課題の一つとなる。先進諸外国では、特に大型の高速増殖炉でタンク型炉を選択する傾向があるが、我が国でも昭和56年度から財団法人電力中央研究所が中心となって、各原子炉メーカーと共同でタンク型炉の成立性に関する研究が開始された。これは、「今後、我が国の高速増殖炉実証炉の設計を進めるに当たり、実験炉、原型炉で経験を積んだループ型炉とともにタンク型炉をも検討対象とするためには、まずタンク型炉の我が国での成立性評価をする必要がある。」との観点に基づくものである。

本報告では、昭和56年度から昭和58年度にわたって実施された「タンク型FBRフィージビリティスタディ」及び昭和59年度から昭和61年度にわたって実施中の「タンク型FBR実用化研究」での研究テーマのうち、耐震成立性評価の基礎技術である(1)流体・構造物系の地震応答解析手法、及び(2)炉容器の座屈挙動評価手法について述べる。

また、これらの評価手法を適用した結果、我が国の厳しい耐震設計条件下で、タンク型高速増殖炉が成立する見通しを得たことについて述べる。

2 タンク型炉耐震設計の技術課題

タンク型炉の炉構造は高温に保持され、かつ複雑な温度変動を受ける。その結果生ずる熱応力に対する強度信頼性(一般に薄肉構造がよい。)と耐震信頼性(一般に厚肉構造がよい。)とを両立させる設計が要求される。タンク型炉の炉構造は、直径、深さとも約20m、重量約1万tの大型構造物である。我が国の厳しい耐震設計条件(地震入力フランスの約3～5倍)に対してこれを成立させることがその課題となる。

図1はタンク型炉の耐震設計上の課題の部分を示すもの

で、その主な課題は次の3項目である。

- (1) 座屈現象などの薄肉構造物に関連する強度評価手法
- (2) 炉心と制御棒との相対変位の評価
- (3) 燃料集合体群などの振動挙動

本報告では、これら設計上の課題を評価するための基礎技術のうち、流体・構造物連成振動解析手法及び炉容器の座屈挙動解析手法について述べ、我が国の地震条件に対してもタ

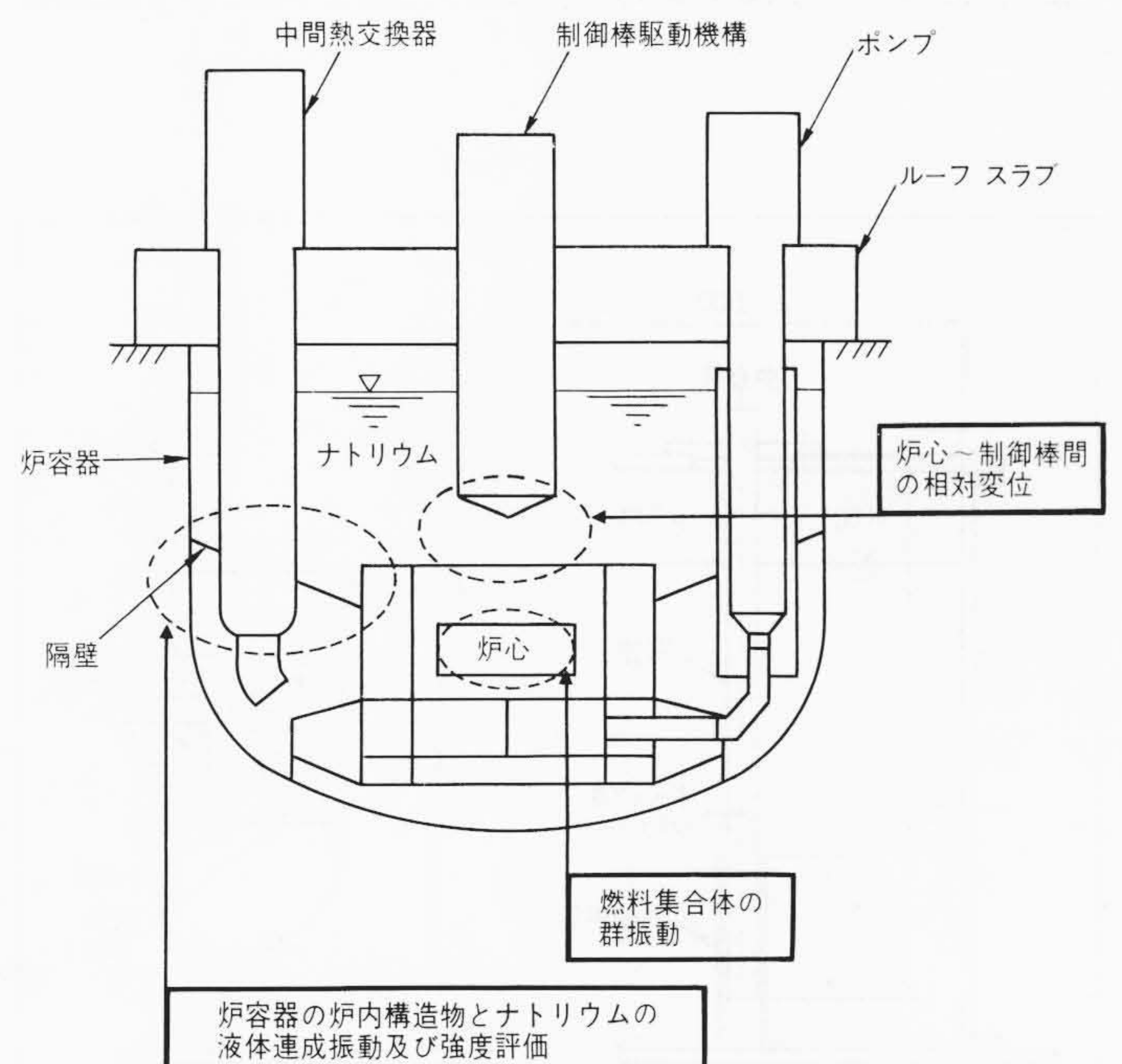


図1 タンク型炉の耐震設計上の課題 本報告では、炉容器の耐震信頼性評価技術に注目している。なお、構造図は概念を示す。

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所機械研究所 工学博士 *** 日立製作所日立工場 工学博士

ンク型高速増殖炉の炉構造が成立することを示す。

3 炉構造の地震応答評価

3.1 流体構造連成振動

タンク型炉では炉心、炉心上部機構、冷却機器の領域を区分する隔壁及び一次冷却系機器を大型の炉容器内に設置し、これらは冷却材の液体金属ナトリウムで満たされている。したがって、炉容器と炉心及びこれらの機器の耐震性を評価するには、流体と構造物の相互作用を考慮した連成振動解析が要求される。

炉容器に着目してみると、約20mの直径に比べて板厚が約45mmと薄く、また深さが直径とほぼ同じである浅形容器であるため、ナトリウムを単なる付加質量として扱うことができない。また、中間熱交換器、ポンプなどの一次冷却系機器、隔壁などの内部構造物は近接する構造物との間で流体を介して相互作用が生じ、各構造物が単独に存在する場合とは振動挙動が異なる。相互作用の結果として、注目する構造物の振動を抑制する制振効果や固有振動数が高くなる支持効果が現われる。これらの流体連成振動効果を取り入れることは耐震設計上有用である。

これらの流体構造連成振動現象を、解析的に明らかにする解析プログラムを模型実験によって検証した。

3.2 流体構造連成振動解析プログラム

(1) 解析プログラムの特徴

3次元流体構造物連成振動解析を対象としたFEM(有限要素法)解析コードを開発した。計算では、ナトリウムを非圧縮性の完全流体として有限要素化し、構造物の各要素に対してナトリウムの流体圧力を仮想質量として評価した後、構造物の質量マトリックスに加え合わせることで、運動方程式を定めて振動解析を行なう。

(2) 模型実験による検証

流体構造連成振動の特徴を把握するとともに、解析手法の検証を目的として模型実験を行なった。図2(a)に示す試験体

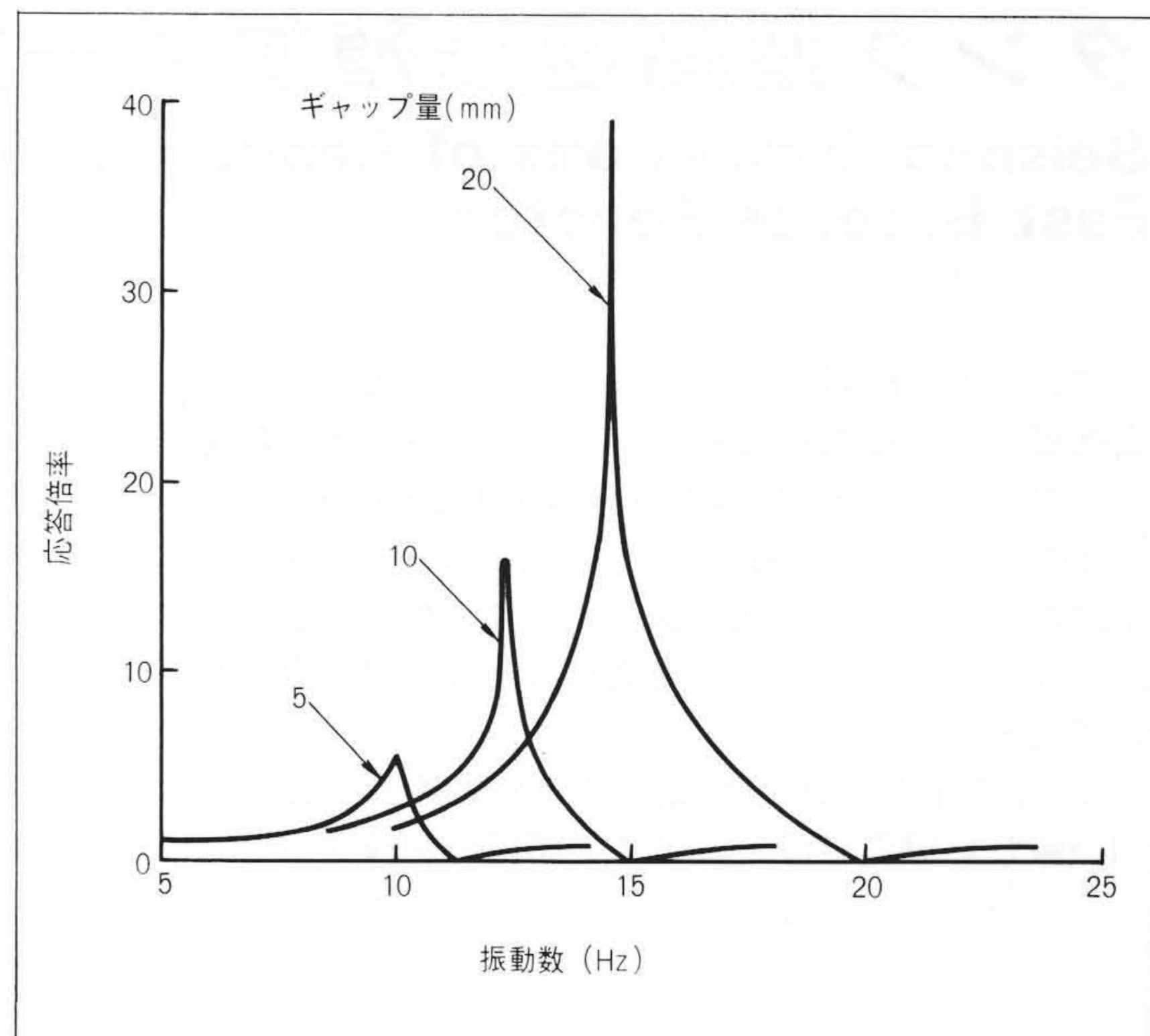


図3 片持ばりの振動応答のギャップ量依存性 ギャップが狭くなるほど固有振動数、応答倍率共に小さくなり、流体の影響が大きくなることを示す。

は、中間熱交換器やポンプのように上部を支持された片持ばり状の構造物の下端が、狭いナトリウム層を介して円筒に囲われている構造物をモデル化したものである。流体としては水を用いた。ギャップ量をパラメータとし、片持ばりの先端の応答を加振振幅に対する倍率で表わしたものを図3に示す。

ギャップが狭くなるほど共振点の固有振動数が下がるとともに、応答倍率も小さくなる。中間熱交換器などのはり状の機器は狭いギャップ内に存在する流体により、見掛け上の質量が増加する付加質量効果及び制振効果を受けている。

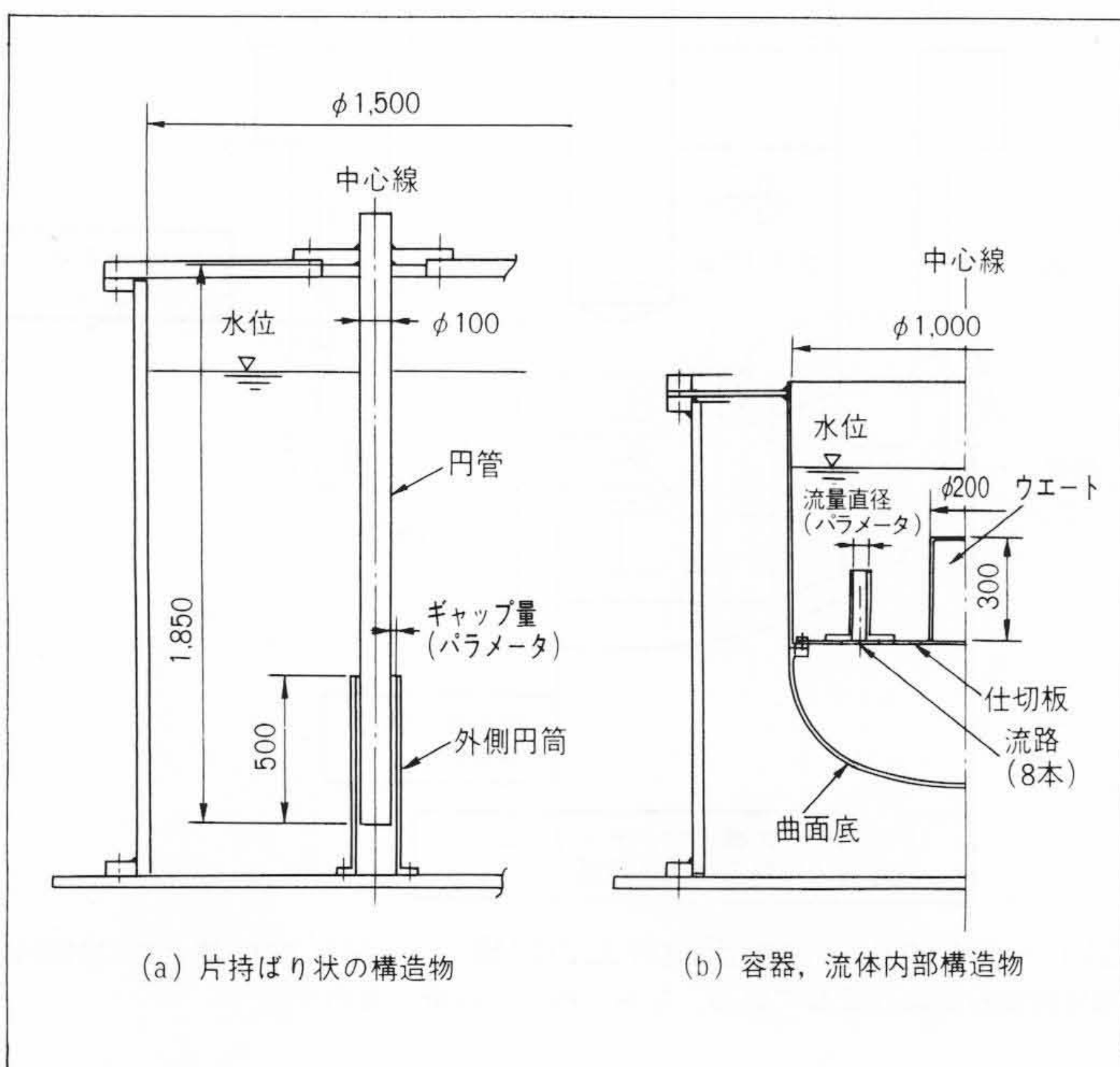


図2 模型実験用の試験体 流体と構造物の相互作用による振動現象を明らかにする。

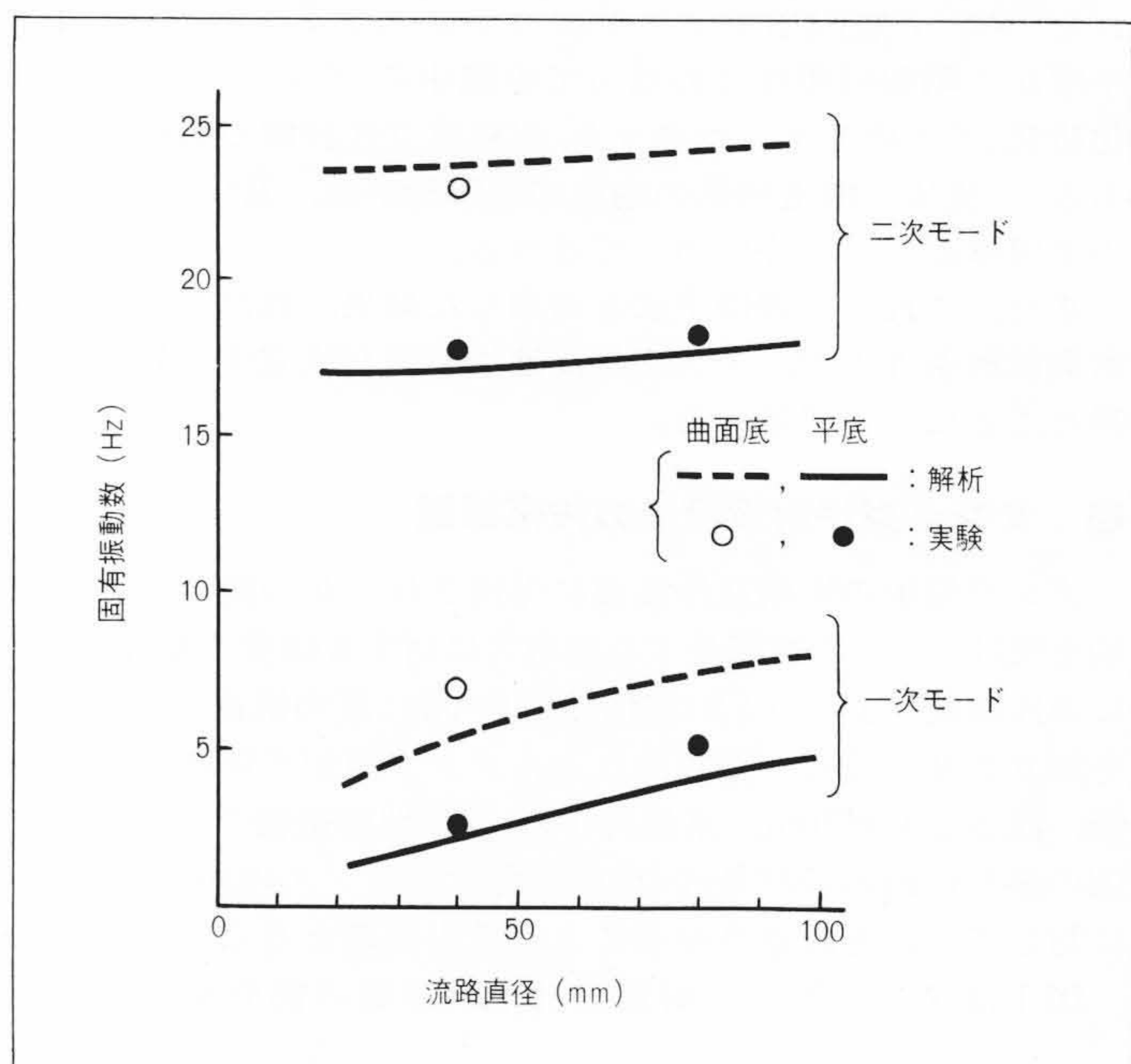


図4 上下方向の固有振動数 流体・構造連成作用のため、流路形状と容器底部の剛性が異なると固有振動数が変化する。

ホットプレナム及びコールドプレナムのナトリウムと炉構造の上下連成振動を観察する試験体の概略を図2(b)に示す。水平隔壁の流路の形状や容器底部の構造の違いによって上下動の固有振動数は図4に示すように変化する。合わせて流体の構造物連成振動解析を行なった。流体の仮想質量を求めるために用いた、流体と構造物との境界の有限要素分割を図5に、上下振動モードの解析結果を図6に示す。一次モードでは内部構造物が振動し、二次モードではルーフスラブの振動に対して内部構造物と容器がほぼ同じ振幅で追従する。流体領域の体積変化の大きい一次の振動モードでは図4に示すように流路条件による固有振動数の変化が大きい。容器の底部を平底とし、曲面底の場合と比べて剛性を低くすると、内部の構造は同一であるにもかかわらず固有振動数が低くなる。内部構造物の振動に対して、構造物間の流体を介した容器底

部構造の剛性による支持効果があることを示している。解析結果は、流路条件の影響と容器底部構造による支持効果をよく説明しており、用いた解析手法は、流体領域をもつ構造物の振動解析手法として妥当であると言える。

実験及び解析によって、タンク型炉に特徴的な構造の振動現象が確認され、更に地震に対する振動応答を定量的に評価することが可能となった。

4 炉容器の座屈限界板厚評価

地震荷重を受ける炉容器の設計では、薄肉胴の座屈限界を検討することが重要である。特に浅形容器であるために横荷重により図7に示すせん断座屈モードが生じやすいこと、及び高温のため材料の降伏応力が低下し塑性域での座屈が生じやすいこと、が座屈挙動での特徴として挙げられる。

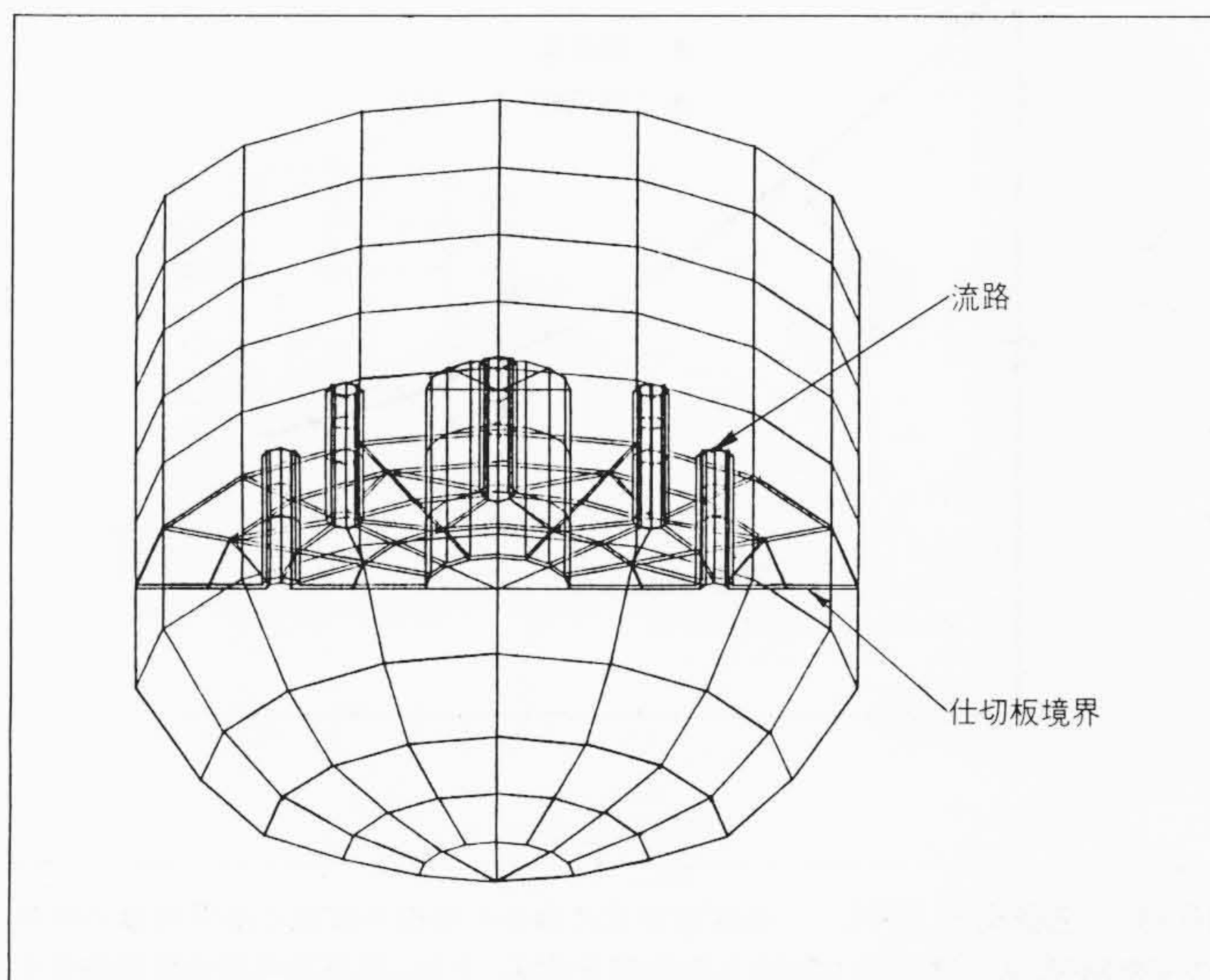


図5 流体と構造物の境界の有限要素分割図 流路のある液体領域との境界も分割し、流体の仮想質量を求める。

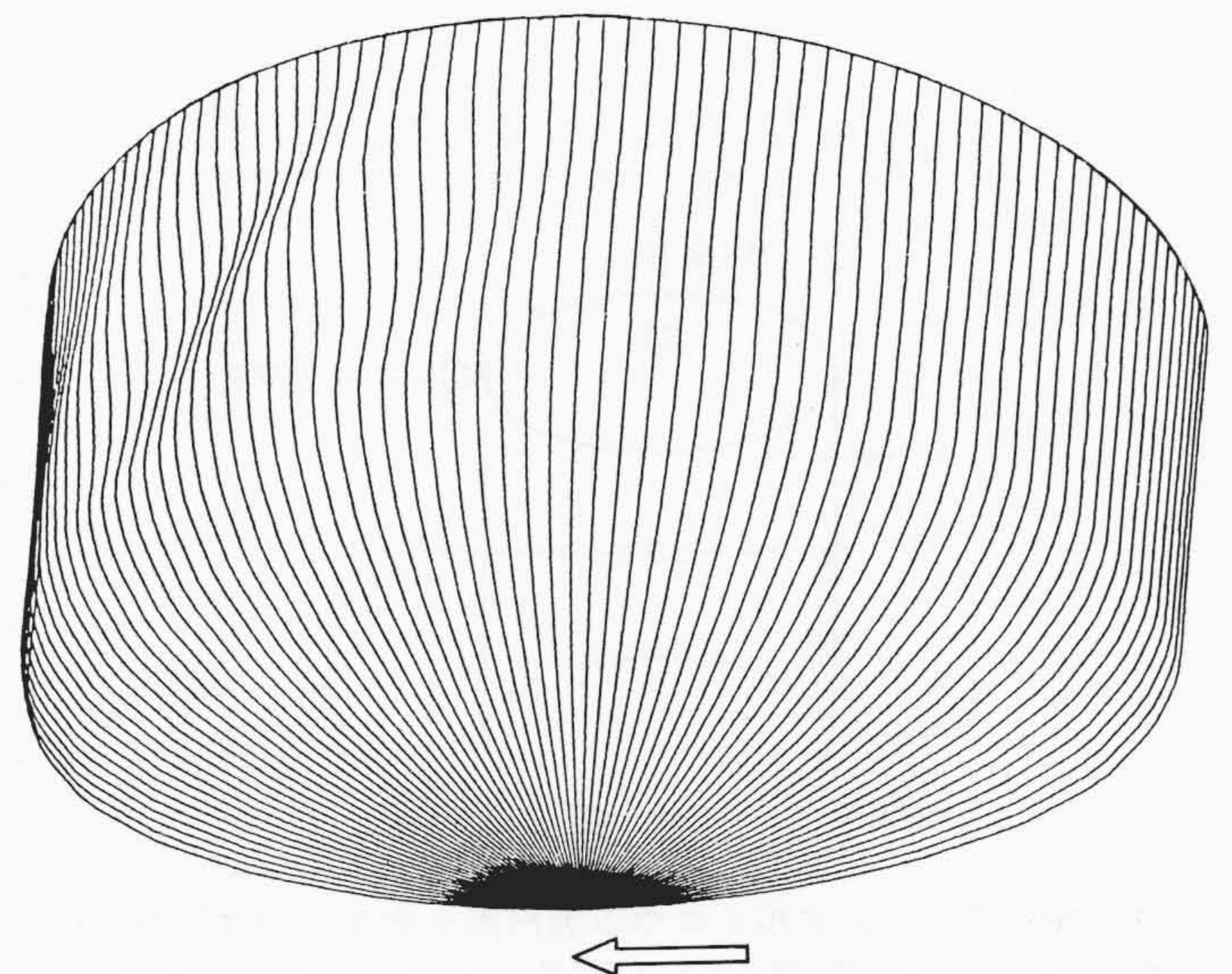


図7 横荷重による座屈モード 背の低い円筒に横荷重が加わると、せん断応力が大きくなり、せん断座屈モードが発生する。

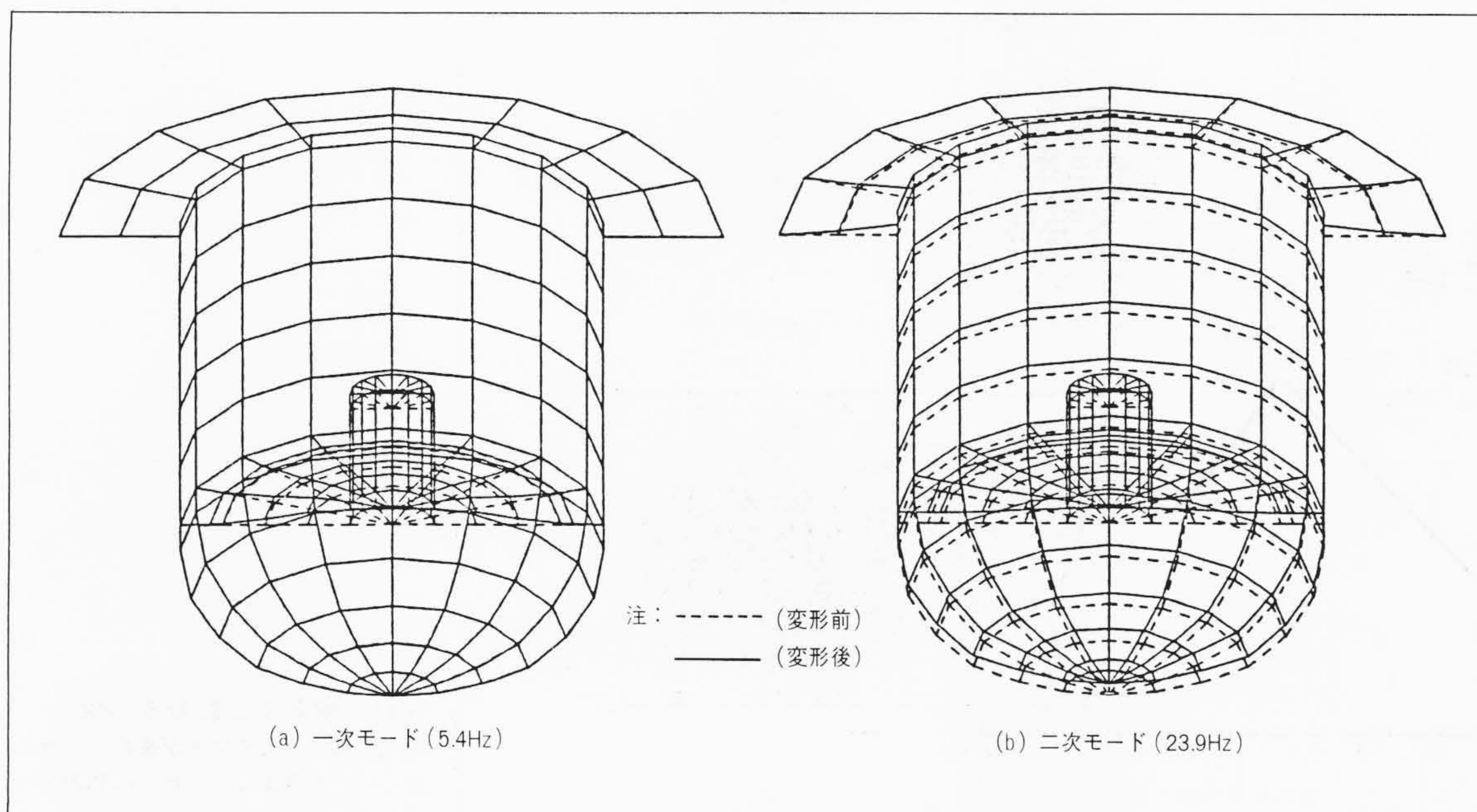


図6 上下振動モードの解析結果 一次モードでは内部構造物が、二次モードでは容器と内部構造物が、ほぼ同じ振幅で振動する。

一方、座屈荷重はまた製作時の初期変形などの各種の影響因子を受けるため、これらの効果を評価することが必要である。円筒容器に横荷重を加えた場合の座屈に関する研究は今まであまり多くないので、実験及び解析による座屈現象の基本特性の把握を試みた。

4.1 座屈実験と解析

座屈現象を把握するため、図8に示す深絞り製のアルミニウム円筒を用いて座屈実験を行なった。材料のアルミニウムは縦弾性係数 $E=68.6\text{GPa}$ 、降伏応力 $\sigma_y=137\text{MPa}$ である。円筒容器を治具に固定し(図9)、軸応力又は横荷重を加えた。いずれの場合にも座屈荷重で急激な変形を生じるとともに座屈後の容器の耐荷能力は減少する。実験によって確認された座屈モードは、線形理論により予想される座屈モード(古典座屈)と同様であるが、座屈荷重は線形理論値よりも低くなっている。

以上の結果から座屈荷重の解析的評価には非線形解析の導

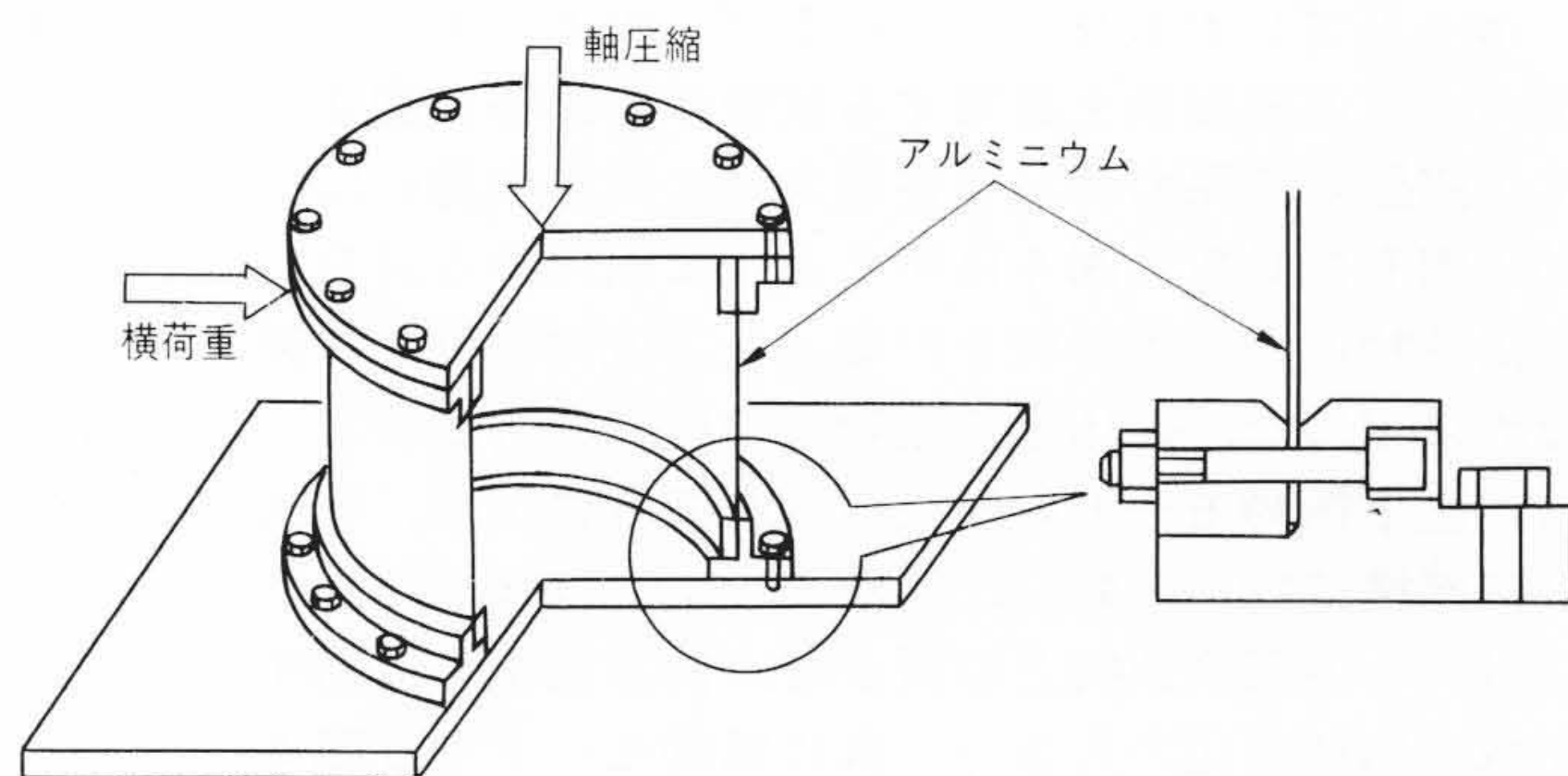


図9 円筒容器組立図 アルミニウム製円筒容器の両端に、板厚12mmの鉄製のフランジを取り付け荷重を加えた。

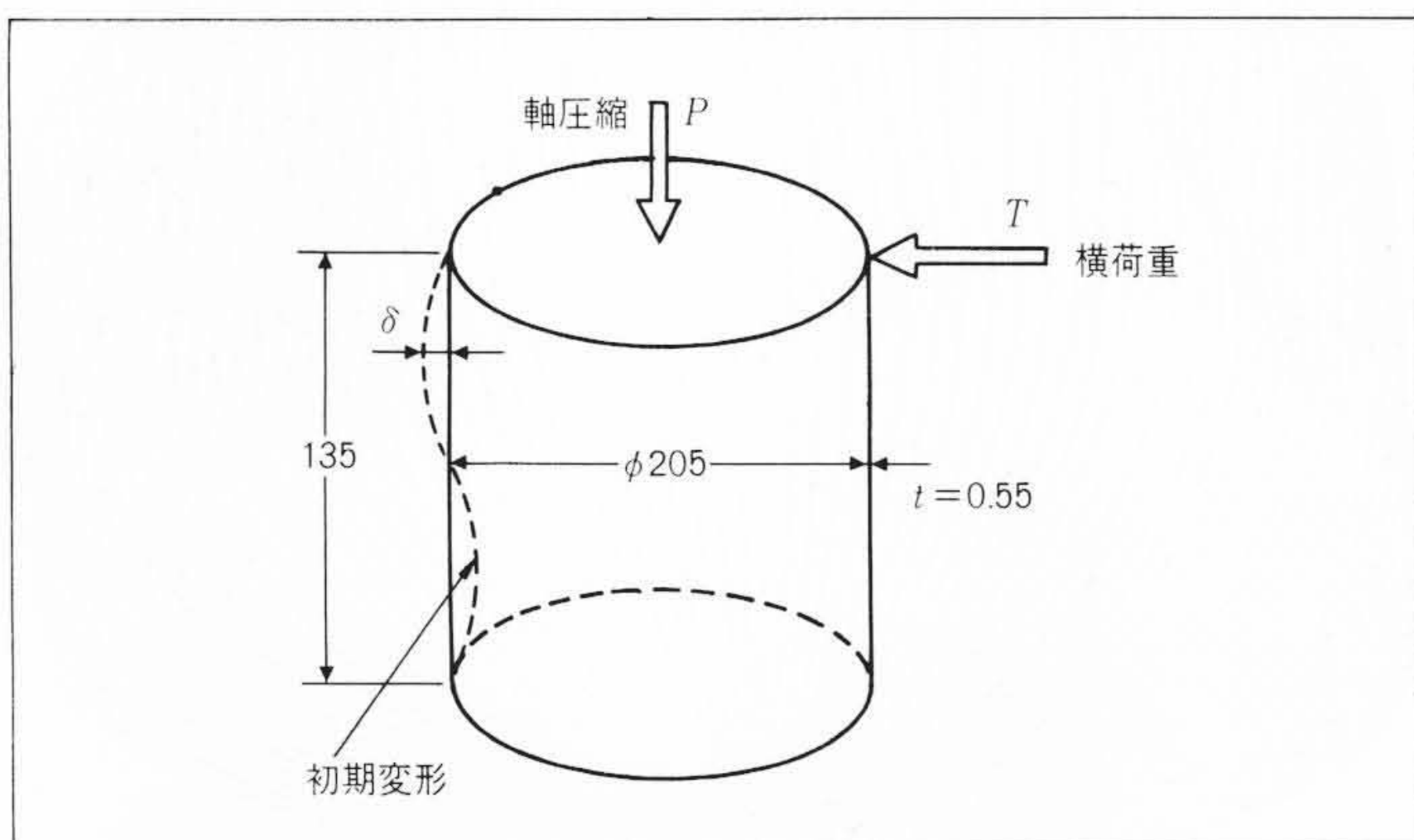


図8 実機直径 $\frac{1}{90}$ のアルミニウム製円筒モデル 初期不整の変形は最も座屈荷重が低下する第二次モードの場合を示す。

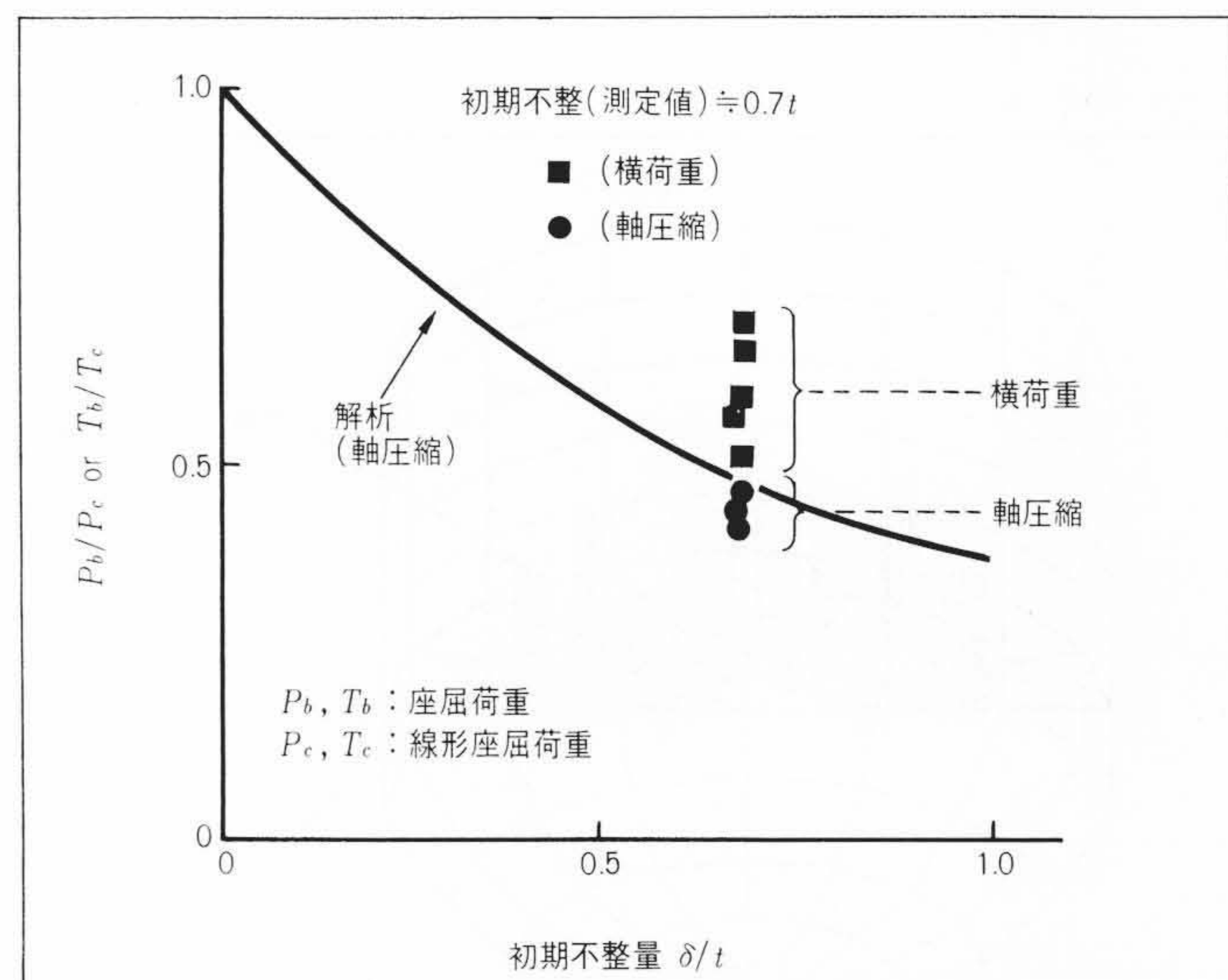


図10 座屈荷重特性 軸圧縮荷重の場合の初期不整量と座屈荷重の関係の解析結果、及び実験値(●印)との比較を示す。また、横荷重の場合の実験値を■印で併記する。

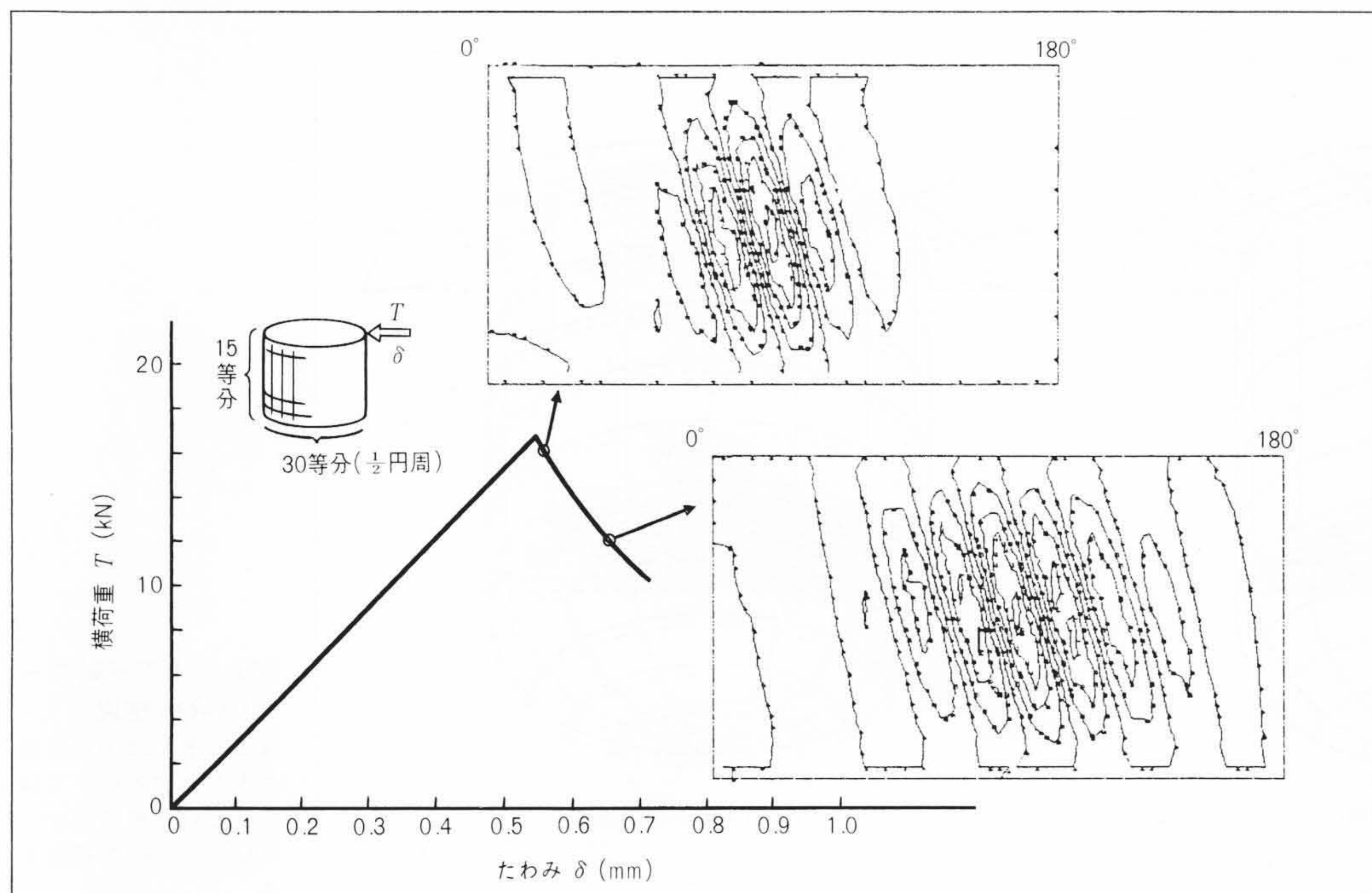


図11 横荷重とたわみ特性 座屈荷重を超えて変形が進むと、せん断モードが発生し、しだいに周囲へ生長してゆく。

入が必要であると判断し、解析手法の開発を行なった。解析手法は2次元軸対称構造物を対象とし、座屈前及び座屈後の変形モードを円周方向にフーリエ級数展開して求めるものである。また、非線形性を導入した平衡方程式を、荷重増分法を用いて解くものである。この方法を用いて、軸対称の初期不整の影響を検討した結果を図10に示す。なお、初期不整の形状は軸方向波数を種々想定し、最も座屈荷重が低下する第二次モードの場合(図8参照)をとった。図10から、初期不整の振幅が板厚と同程度になると、座屈荷重は線形理論値の約40%に低下することが分かる。同図に軸圧縮荷重及び横荷重の実験値をそれぞれの線形理論値で無次元化して併せて示す。実験に用いた試験の初期不整の振幅は、実測の結果板厚 t の約0.7程度であり、軸圧縮の場合には解析結果と実験結果とはほぼ一致している。また、横荷重の場合の、座屈荷重は軸圧縮荷重の場合ほど初期不整に敏感ではないことが分かる。

横荷重を受ける場合の解析は、円周方向のモードが複雑なため一般のシェル要素を用いた解析が便利である。横荷重を加えた場合の円筒容器の荷重とたわみの関係は、図11に示すように荷重点で急激にせん断モードが発生し、荷重の増加とともにしだいに変形が増大する。このせん断座屈の場合にも初期不整を考慮した解析が必要であるが、図10で見ると、軸圧縮の初期不整による座屈荷重低下率を準用することで、安全側の評価を得るのが実際的な評価としては有効である。

一方、軸圧縮座屈に対してはナトリウム内圧の効果は座屈荷重を約15%増加させ、炉容器ルーフスラブ近傍の温度分布による熱変形は、座屈荷重を約25%低下させることが解析的に予想される。更に、境界条件として完全固定と単純支持の比較を行なったが、この差は境界近傍の変形に差が生じるだけで座屈荷重への影響は小さいことは確認している。

4.2 炉容器の座屈限界板厚の評価

設計荷重に対して実機のせん断座屈の限界板厚を求める方法について検討した。

実機では高温で使用されるため、構造材(SUS304)の降伏応力は常温時に比べて低下する。塑性域での座屈応力評価は安全側に評価し、降伏応力を用いた。

弾性せん断座屈応力 τ_e 及び塑性せん断座屈応力 τ_y は既に各影響因子まで考慮して計算可能であるから、この座屈応力と炉容器板厚の関係を図12のように表示する。次に炉容器の板厚と地震時の発生応力の関係を同図の点線のように求める。

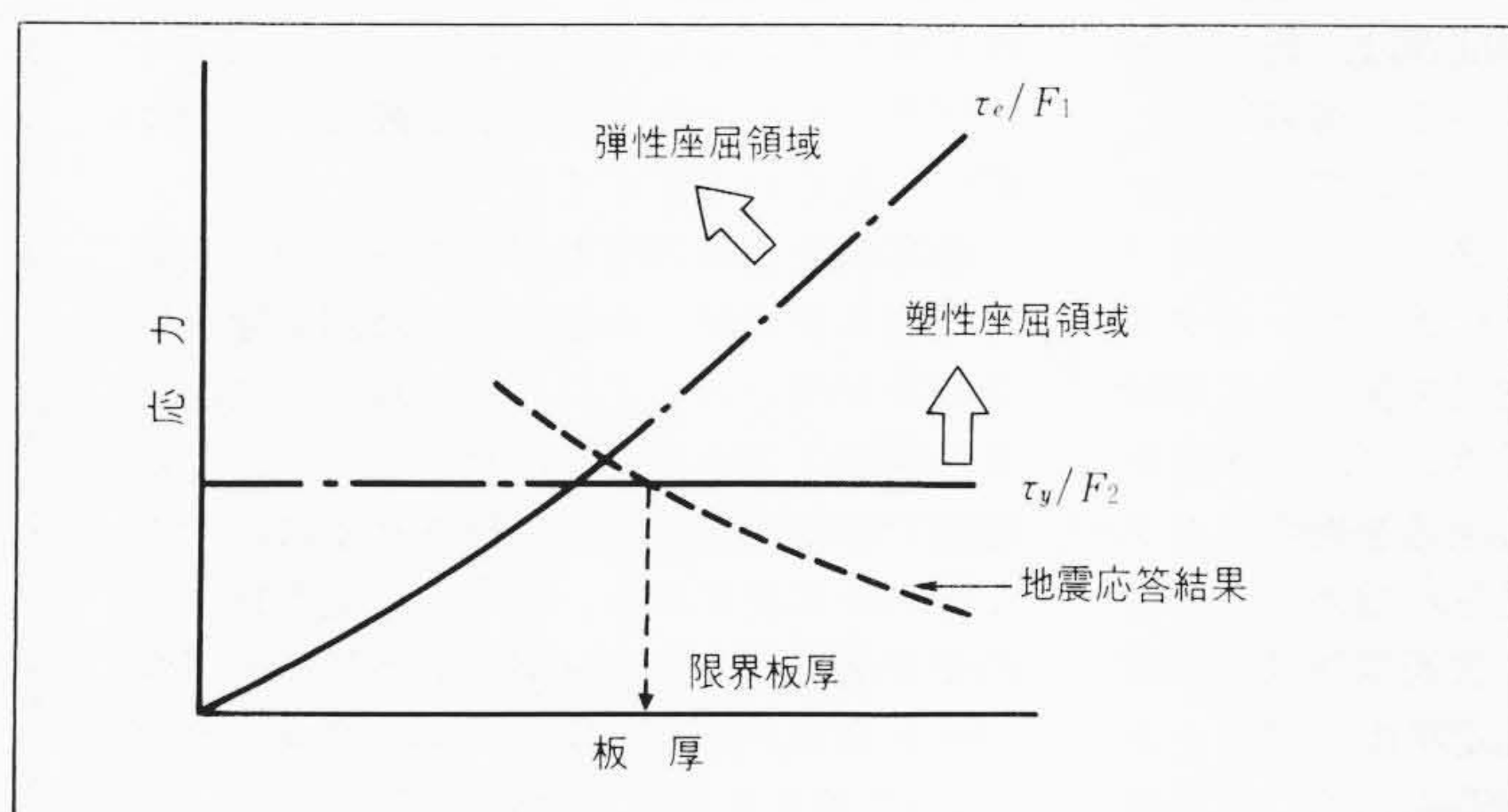


図12 炉容器限界板厚 τ_e は各因子を考慮した弾性座屈応力、 τ_y は塑性座屈応力で、温度により変化する。破線は地震により発生する応力と板厚の関係を示す。ここで F_1 、 F_2 は各々に対応する安全率である。

ただし、応力は座屈発生箇所について着目したものである。この曲線と τ_e/F_1 あるいは τ_y/F_2 のいずれかの交点が最初に座屈を生じる限界板厚である。いま材料をSUS304、温度を530°Cとして $\tau_y=70\text{MPa}$ を用いると、限界の板厚は45mmとなる。設計的には更にこの値に対して安全率 F_1 、 F_2 を確保することが必要である。軸圧縮応力についても同様な検討を行なうことができる。

5 実機試構造の炉容器耐震性評価

以上述べてきた耐震解析手法を用いて、電気出力1,000MW級タンク型原子炉構造の評価を行なった。原子炉構造を図13に、設計限界地震動(S_2 レベル)による原子炉構造据付レベルでの応答スペクトルを図14に示す。表1は主要固有値解析結果と地震動応答解析結果を示すものである。また、この応答値による炉容器の座屈評価結果を表2に示す。地震応答荷重(B)は炉容器に加わる垂直荷重 F_v 、モーメント荷重 M 、及び横荷重 F_H に対する座屈限界荷重(A)に比して十分小さい。したがって、試構造は構造強度上成立することを示している。

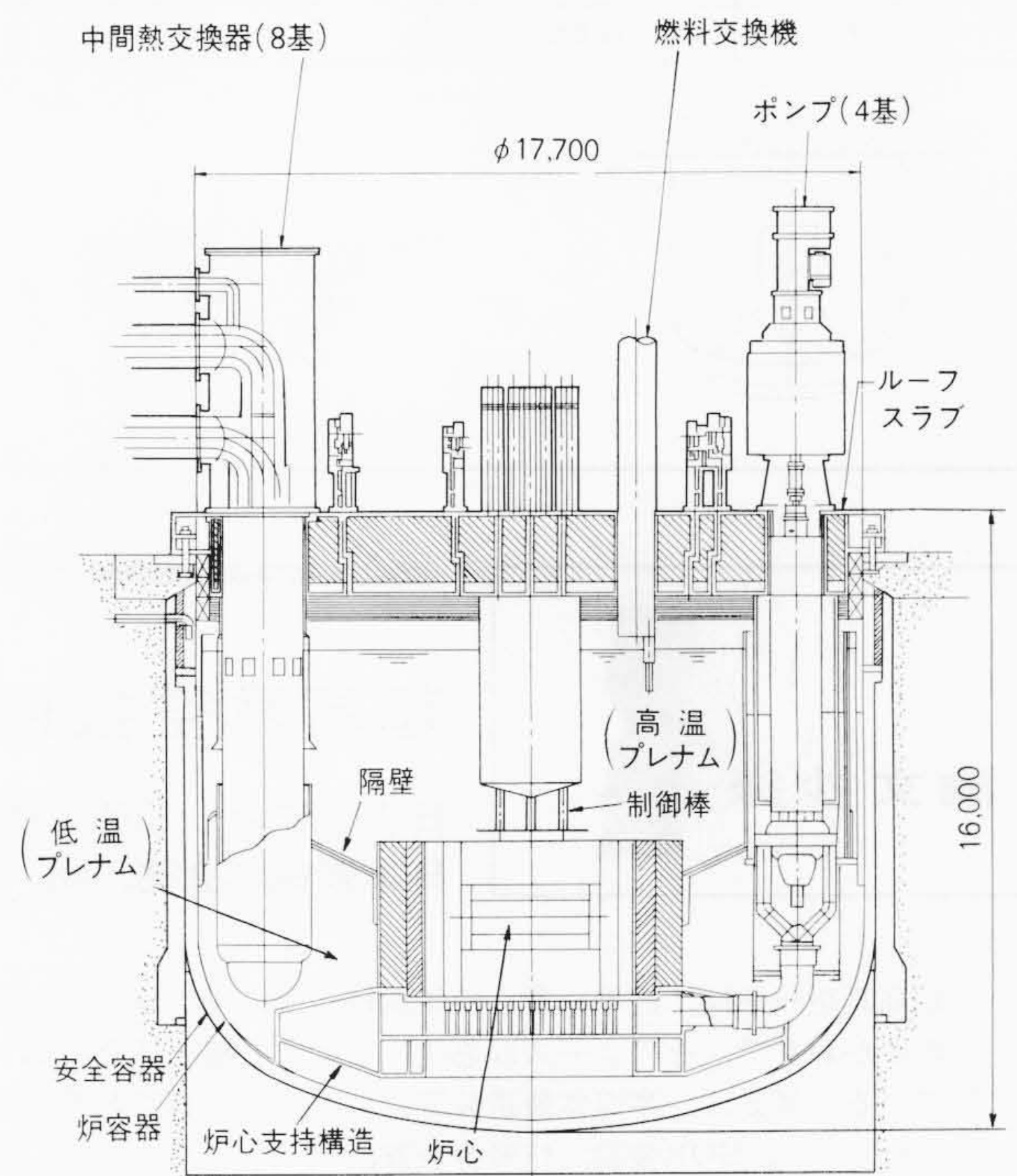


図13 電気出力1,000MW実証炉の試構造 炉容器直径17,700mm、高さ16,000mm、炉容器板厚45mmの実証炉用試構造を示す。

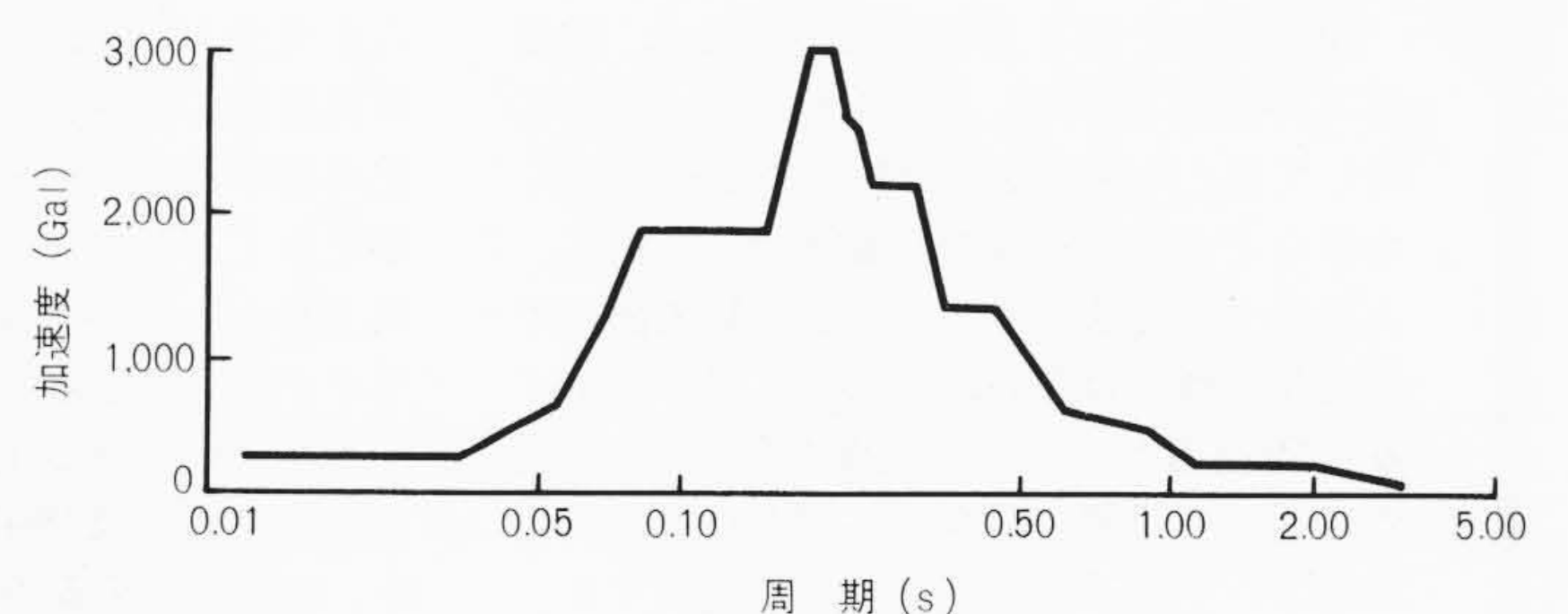


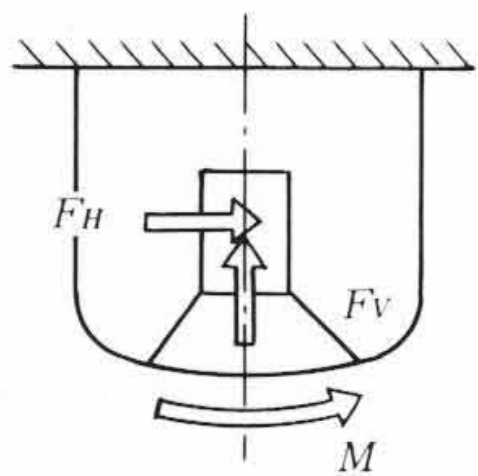
図14 炉構造据付けレベルの床応答スペクトル(S_2 レベル) 地盤のせん断速度1,500m/sでの設計用応答スペクトルで、原子炉建屋の一部を岩盤内に埋め込み、応答スペクトル値の低減を図っている。

表1 炉容器の地震応答 想定S₂地震波に対する炉容器の応答結果を示す。

項 目		地震動応答結果
固有値	水 平 モ ー ド	8.4 Hz
	垂 直 モ ー ド	7.5 Hz
地震応答	炉心-制御棒相対変位	
	水平方向	18 mm
	垂直方向	27 mm
	炉 容 器 地 震 荷 重	
	水平方向	64.5 MN
	垂直方向	24.3 MN

表2 炉容器の座屈評価 座屈限界荷重は、炉容器の温度分布、ナトリウムの内圧分布及び初期不整 $\frac{\delta}{t} = 1.0$ を考慮した。

	座屈限界荷重(A)	地震応答荷重(B)	安全率 $\frac{(A)}{(B)}$
垂 直 荷 重 F_v	137 MN	24.3 MN	1.5*
モーメント荷重 M	1,240 MN・m	607 MN・m	
横 荷 重 F_H	99.5 MN	64.5 MN	1.6



$$1.5^* = \frac{1}{\frac{24.3}{137} + \frac{607}{1,240}}$$

6 結 言

我が国でのタンク型炉の耐震成立性を評価するための基礎技術である(1)流体・構造物系の地震応答解析手法、及び(2)炉容器の座屈挙動評価手法についてそれぞれの基礎実験と対応させて述べた。これら解析技術を用いて実証炉炉構造の耐震性を評価した結果、我が国の耐震設計条件下でも適切な設計対応により十分成立をすることが分かった。

今後は開発した手法を炉内構造物の詳細な設計に適用する一方、温度分布や製作時の変形による初期不整量をより定量的に把握し、構造耐震信頼性の向上を図っていく。

参考文献

1) 服部：FBRタンク型炉のフィジビリティ・スタディ，原子力工業，**30**，2，65～76(1984年2月)

2) A. Sakurai, et al.: Fluid-Coupled Vibration Analysis of Reduced Models of Pool-type LMFBFR, Proc. 8th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, **E**, EK1/8 (1985)

3) Y. Yamamoto, et al.: Effects of Geometric Imperfections and Boundaries of the Buckling Strength of a Spherical Shell: Computers and Structures, **19**, 1-2, 285～290(1984)

4) C. Brebbia, et al.: Analysis of Geometrically Nonlinear Plates and Shells by the Finite Element Method: M. I. T. Research Report, R 68-18(1968)

論文抄録

超高真空技術について

日立製作所 蒲原秀明・石川雄一・他1名
日本機械学会誌，88—799，609～615(昭60-6)

超高真空技術は、近年、多くの先端技術とのかかわりで、そのニーズは急速に増大している。例えば、半導体製造装置、スペースチャンバ、SOR装置、核融合装置、表面科学研究装置などは $10^{-6} \sim 10^{-9}$ Paの状態を安定して保持することが要求されており、これらの分野では、そのニーズは今後ますます増大すると考えられる。

本稿では、超高真空装置で所定の超高真空状態を作り、応用するための要素技術を概説した。

超高真空を作る上での技術課題は、放出ガスの低減と排気システムがある。前者に関しては、真空容器壁の表面のごみ、油分、水分などを除く一般の脱脂洗浄に加えて、次の五つの方法が考えられる。(1)表面の不活性化処理を行ない、吸着ガス量を低減する。(2)高温ベーキング処理を行ない、吸着ガスを追い出す。(3)真空溶解を行なった材料など、不純物量が低い材料を選択する。(4)窒化物や硫黄を表面に被覆、折出させ、

吸着ガス量や拡散を抑制する。(5)ガスの吸着状態を制御する。

真空装置部品としてはステンレス鋼が主流であるが、近年、高エネルギー加速器、分子線エピタキシ装置などにアルミニウムが使用されている。なお、近年、超高真空の分野では、高エネルギー粒子を含んだ真空系(ホットバキューム)での材料と高エネルギー粒子の相互作用の問題は、新たな研究の必要性を生みだしている。後者に関しては、拡散ポンプ、イオンポンプが従来から主流であるが、近年、クリーン真空及び排気速度の高速化やシステムのコンパクト化の要求が強く、磁気軸受を採用して潤滑油をなくしたターボ分子ポンプ、信頼性が向上した小形ヘリウム冷凍機を携帯したクライオポンプも広く使用され始めている。

真空を応用する上での技術課題は、機構部品の信頼性及び圧力測定精度の確保がある。超高真空装置の機構部品には、(1)装置の外部から内部への運動の導入器、(2)歯車、

軸受及び軸、(3)ベロー、(4)バルブなどがある。これらの部品に対しては信頼性、密封性のほかに部品からの放出ガス量及びじんあいの発生が小さいことが強く要求されている。そのため、材料の選定、加工法及び処理法には十分な配慮が必要である。

槽内に装着される機構部品の潤滑剤としては、蒸発減量が小さく、低摩擦で耐摩耗性の優れているものが要求され、二硫化モリブデンなどの固体潤滑剤が最も一般的に用いられているようである。

超高真空装置の圧力測定では、全圧測定に電離真空計が、分圧測定には四重極質量分析計が用いられている。それぞれ測定できる範囲は7けた、9けたにも及び、この範囲で信頼性と精度を維持させるには大きな努力が必要である。筆者らは電離真空計の中で通常用いられるBAG(ベアードアルパート真空計)をSRG(スピニングロータージュ)で校正を行ない活用している。