

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

Rev.0

解析コード（LS-DYNA）説明資料
（参考資料）

平成 28 年 9 月

東北電力株式会社

東京電力ホールディングス株式会社

中部電力株式会社

中国電力株式会社

日本原子力発電株式会社

目 次

LS-DYNA

1. はじめに	1
2. 適用対象事象及び適用実績.....	2
3. 解析モデルと解析結果の例示.....	4
3.1 計算要素	5
3.2 境界条件	8
3.3 材料モデル	11
3.4 爆発源の設定方法.....	17
3.5 解析フロー	20
3.6 入出力	21
3.7 解析結果の例示.....	22
4. 解析結果の検証	29
5. 参考文献	36
添付1 運動エネルギーから圧力として伝わる時の考え方について	1-1
添付2 反射波の考慮について.....	2-1
添付3 ペDESTAL構造応答評価における判定基準について	3-1

1. はじめに

本資料は、格納容器破損防止に関する重大事故対策の有効性評価（以下、「有効性評価」と称す。）において、格納容器破損モード「原子炉压力容器外の溶融燃料 - 冷却材相互作用」（以下、「FCI」と称す。）に対して参考として示した水蒸気爆発の発生を仮定した場合の格納容器の健全性への影響評価に適用するコードのうち、LS-DYNAコードについて、

- ・適用対象事象及び適用実績
- ・解析モデルと解析結果の例示
- ・解析結果の検証

に関してまとめたものである。

なお、JASMINEコードの計算結果をインプットする必要があるが、このJASMINEコードに対する説明は別資料（解析コード（JASMINE）説明資料（参考資料））にて行う。

2. 適用対象事象及び適用実績

LS-DYNAコードは、原子炉圧力容器外において FCI による水蒸気爆発の発生を想定した場合、圧力容器の支持構造物であるペDESTALへの荷重を評価し、その健全性を確認することを目的として使用する。

(1) 適用対象事象

シビアアクシデント発生時に原子炉圧力容器の破損を想定する場合、溶融炉心・コンクリート相互作用の緩和策として、格納容器下部への水張りが実施される。原子炉圧力容器から溶融炉心が落下した場合、圧力容器内での熱水力条件に対して、低圧かつ高サブクール度の冷却水と高温の溶融炉心の接触により、水蒸気爆発が発生する可能性が指摘されている^{[1][2]}。

この炉外における FCI による水蒸気爆発発生時の評価は、水蒸気爆発解析コード JASMIN Eにより実施し、水蒸気爆発現象に伴う流体の圧力及び運動エネルギー並びに融体デブリの振る舞いを評価する。

LS-DYNAコードでは、この JASMIN Eコードによって得られた評価結果に基づき、水蒸気爆発発生時の爆発源の状態を入力条件として与え、流体中を伝播する圧力波がペDESTAL構造材に荷重として作用する構造応答を評価する。

(2) 適用実績

LS-DYNAコードは、ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL) で開発された DYN A 3 Dコードに基づき、リバモアソフトウェアテクノロジー社 (LSTC) が開発した汎用有限要素解析コードである^[3]。

DYN A 3 Dコードは、重量物の構造材衝撃問題を対象として開発されており、衝撃波による非線形動的応答評価を目的とするため、陽解法による解析を採用している。LS-DYNAコードは、自動車の衝突安全解析への適用を目的として開発されており、DYN A 3 Dと同様に、衝撃問題に対して陽解法を適用する。

LS-DYNAコードは、自動車製造分野への適用を主目的として開発されているが、時間と共に接触条件や構造物形状が変化するような非線形解析が可能であり、衝撃や爆発的燃焼による圧力伝播、構造物の塑性歪み、健全性の解析に対応している。このため、自動車産業に限らず、航空宇宙、防衛、電気機器、建設・土木分野等にも応用されており、原子炉圧力容器外において水蒸気爆発が発生した際のペDESTAL構造材への荷重応答評価にも適していると言える。

原子力分野における爆発及び爆轟に伴う衝撃荷重の構造材応答評価にLS-DYNAコードを適用した例について概要を以下に示す。

a. BWR 配管における混合ガス（水素・酸素）の燃焼による配管健全性評価^[4]

BWR 配管の主蒸気の放射線分解により生じる可燃性混合ガス（水素・酸素）の燃焼による配管内での爆轟を模擬した強度試験に対し、LS-DYNAコードにより試験模擬解析を実施している。LS-DYNAコードによる強度解析は、試験体の周方向ひずみを良好に再現することが確認されている。

b. 原子力発電施設等に係る構造物の爆発衝撃挙動解析^[5]

この研究は原子力発電所施設等での爆発衝撃荷重に対する構造物の堅牢性を評価するための解析モデルを構築する目的で実施されており、水中爆轟バブル挙動解析手法の確立と地中に設置された構造物の衝撃荷重に対する挙動評価手法の確立を主課題として検討されている。LS-DYNAコードによるこれらの課題に対する評価の結果、水中爆轟バブル挙動については、必要な時間スケールでの解析が適切に実施できることが確認され、地中構造物に対する堅牢性評価については、試験結果とトレース解析の比較から、爆発衝撃問題に対する解析モデルが構築可能であるとの知見が得られている。

3. 解析モデルと解析結果の例示

LS-DYNAコードは、構造物などの大変形応答を解析するための非線形動的構造解析ソフトウェアであり、静的問題から準静的な塑性加工問題、波動の伝播を考慮するような衝撃問題などの解析が可能である。時刻歴応答解析では、時間積分に中央差分による収束計算が不要な陽解法を用いて解析するため、落下・衝突のような非線形性の強い問題でも解が発散せず、安定して解が得られる。またLS-DYNAコードの使用実績としては、自動車・航空宇宙・造船などの産業で製品の安全性対応や高品質化などに幅広く活用されている。

陽解法の特徴は、着目している要素の隣接する過去の要素情報しか現在の状態に影響を与えないということである。したがって衝撃解析では、波動の伝搬速度である音速 c が重要な意味を持っており、いま着目する要素（要素サイズ Δe ）で、音速 c の影響による現象を陽解法で安定に実行するためには、時間積分の刻み幅（ Δt ）に Courant 条件と言われる制約がある。

$$\Delta t = \frac{\Delta e}{c}$$

ここで連続体が構造物の場合、ヤング率 E 、密度 ρ とすると、構造物内での音速 c は、

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

連続体が流体の場合、体積弾性率 K 、密度 ρ とすると、流体内での音速 c は、

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

である。FCI 時の構造応答解析で取扱う連続体のおよその音速 c は、鋼材で 5000 m/s、コンクリートで 3400 m/s、水中で 1500m/s、空気中で 330 m/s である。

LS-DYNAコードでは、時間積分の刻み幅 Δt を、すべての要素で決定される時間増分の中で最小のものを自動的に用いている。

3.1 計算要素

一般的に連続体（流体・固体）を記述するための手法的な観点から分類すると、LS-DYNAコードでは以下の3種類がある。このうちALE要素を用いた手法は、流体構造連成解析手法としては、LS-DYNAコードでは最も実績があるものの一つである。各要素の概念を図3-1に示す。

(a) Euler 要素

空間に固定した座標を用い、各瞬間における速度、圧力などの物理量の変化の様子を空間座標と時間の関数として記述する。(メッシュの中を物質が移動) 流体の場合、特定箇所を追跡し、その位置を確認することが難しいことから、Euler要素を用いることが一般的である。

(b) Lagrange 要素

物質の位置、速度、圧力などの物理量の時間変化と共に座標が変形する。境界面が移動または変形しても、メッシュが追従するので主として固体に対して適用性がある。

(c) ALE 要素

Euler要素とLagrange要素の中間的な座標を用いる。物体の変形や流動とは無関係に任意に動かすことのできる参照座標系を用いて連続体の運動を記述する方法。Euler要素では移動境界を表現するには特別な工夫を必要とするが、ALE要素では、移動境界を比較的容易に表せる。

また、幾何形状から分類すると、以下の代表的な2種類がある。

(d) Solid 要素

標準的な三次元体積要素。8節点6面体Solid要素や6節点5面体Solid要素などがある。

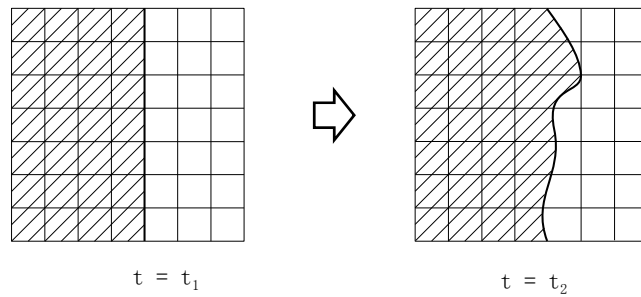
(e) Shell 要素

三次元モデルでは、3節点あるいは4節点の薄板シェル要素として、板厚方向の寸法がそれ以外の寸法よりもきわめて小さい構造物をモデル化するのに使用される。二次元モデルでは、平面ひずみ要素や軸対称要素などに使用される。

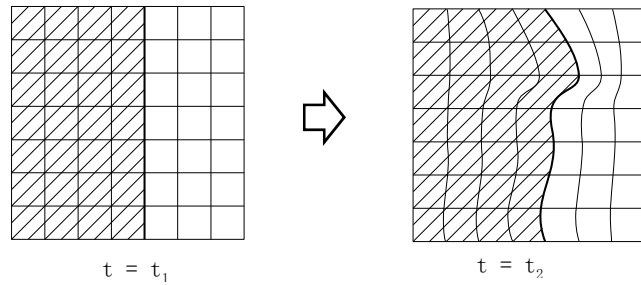
LS-DYNAコードでは、三次元のペDESTALの構造応答の観点から、構造材に力を伝える流体にはALE Solid要素、構造材にはLagrange Solid要素を用いる。構造材の各メッシュ分割は、ペDESTALの壁厚方向、周方向及び高さ方向に十分に解析精度を確保できるサイズとする。流体側のメッシュサイズは、力のやり取りの関係から構造側と同サイズにすることが推奨されていることから、流体と構造の連成境界面では同サイズとなるように設定する。

流体や固体の連続体の挙動を記述する基礎式としては、連続の式（質量保存則）・運動方程式（運動量保存則）・エネルギー保存式の3式が必要となる。この3式と物質の性質を表

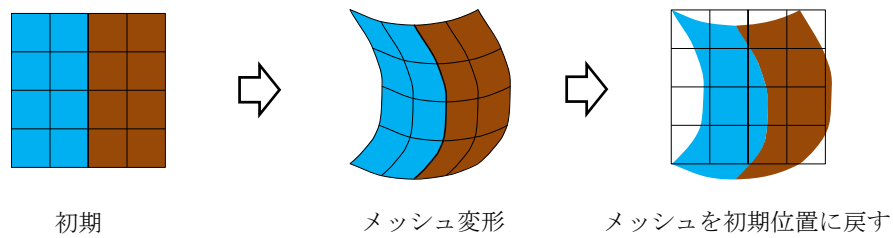
現するための状態方程式や材料構成式とが連立して解かれることにより，連続体の運動，すなわち，流体と固体の移動，変形及び動的な相互作用を求めることができる。数値解法上は，有限要素法による空間の離散化・中心差分に基づく，陽解法と呼ばれる極めて微少な時間幅で数値的に積分する方法が用いられている。



(a) Euler 要素の概念



(b) Lagrange 要素の概念



Lagrangian ステップ
通常の構造解析と同様に計算する

Advection(移流) ステップ
時間を進めず、メッシュを初期位置に戻し、物理量をマッピングする

(c) ALE 要素の概念

図 3-1 各要素タイプの概念

3.2 境界条件

原子炉圧力容器を支持するペDESTAL内のリブ配置構造を考慮して、解析モデルは三次元体系とする。図 3-2 に示すようにペDESTAL基部は PCV 底部コンクリート内に埋没されており、構造的には剛体と見なせることから、図 3-3 に示す FCI 解析時の拘束条件として、PCV 底部コンクリート内に埋没しているペDESTAL鋼板は完全拘束とする。

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

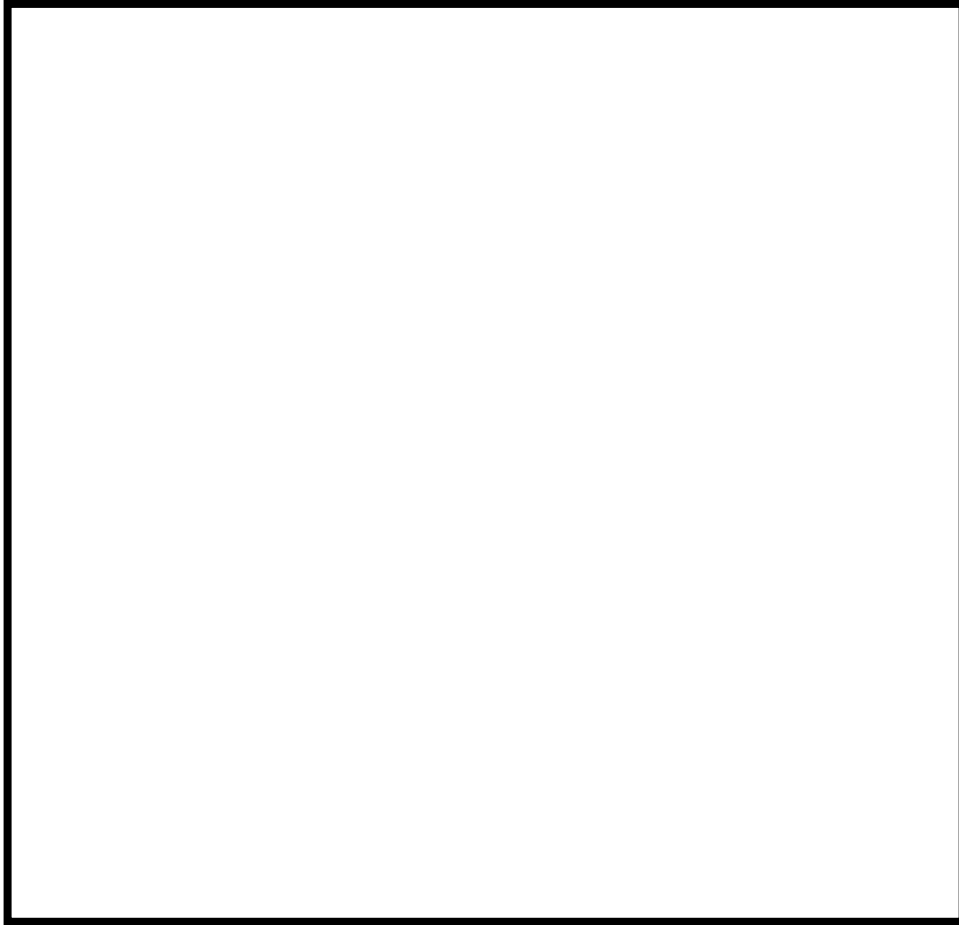


図 3-2 ペDESTALの設置構造

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

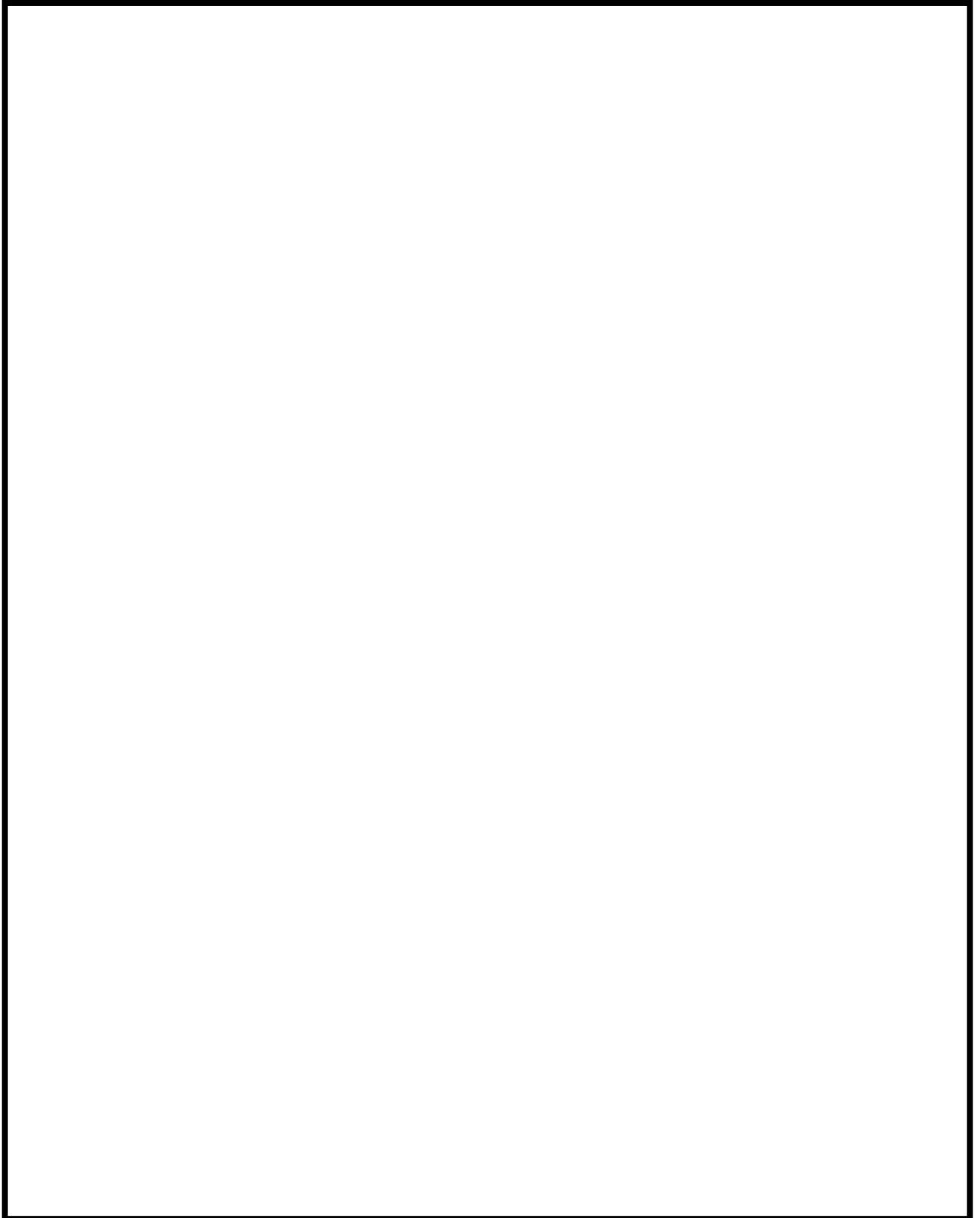


図 3-3 FCI 解析時の拘束条件

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

3.3 材料モデル

3.3.1 計算体系

今回の評価では三次元モデルを用い、で評価を実施している。本評価では、気相部、液相部、爆発源、鋼板及びコンクリートをモデル化しており、縦リブ鋼板も想定している。また、開口部の影響を考慮するため、CRD 搬入口高さ位置に開口部を設定している。

3.3.2 流体モデル

流体の影響を考慮する際、特定の粒子の運動を知るより、空間に固定されたメッシュ内での流動状態や時間変化を知る方が重要である。また、構造材との連成を考慮した場合、流体は移動境界を比較的容易に表せる ALE 要素を用いるのが適当である。以下に流体要素のプロパティ一覧を示す。なお、想定したセル形状を考慮し、Solid モデルを採用する。

表 3-1 要素プロパティ一覧

部位	要素
爆発源	ALE 要素 (Solid)
液相	ALE 要素 (Solid)
気相	ALE 要素 (Solid)

3.3.3 構造材モデル

構造材の変形を考慮する際、構造材メッシュの変形を考慮する必要がある。メッシュ自体の変形を考慮する場合、粒子の集まりが時間とともに、どのように動いていくか（メッシュ点がどのように動いていくか）に着目する Lagrange 手法を用いるのが適当である。以下に構造材要素のプロパティ一覧を示す。なお、厚さ方向の影響も確認するため、鋼板についても Solid モデルを採用する。

表 3-2 要素プロパティ一覧

部位	要素
コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)
鋼板	Lagrange 要素 (Solid)

3.3.4 材料モデル

表 3-3 と表 3-4 に鋼材とコンクリートの材料特性を示す。表 3-1 及び表 3-2 の設定の基
づき、解析にあたっては個別プラントの密度、ヤング率、降伏応力等を入力する。

流体から構造材に力が掛かることで応力が発生する。この応力により構造材に歪みが発
生する。このときの応力歪み曲線をコンクリート及び鋼板について図 3-4 及び図 3-5 に示
す。なお、コンクリートに関しては、最大の力を受ける圧縮方向の応力歪み曲線で代表す
る。

表 3-3 鋼材の材料特性

項目	設定
構成則	等方硬化則
破壊則	— (入力では考慮せず、解析 結果を見て判断)
密度	SPV490 の値
ヤング率	
降伏応力	
塑性ひずみ特性	

表 3-4 コンクリートの材料特性

項目	設定
構成則	等方硬化則で近似
破壊則	— (強度部材では無く考慮 しない)
密度	個別プラントの設計強度 による値
ヤング率	
降伏応力	
塑性ひずみ特性	

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。



図 3-4 コンクリートの応力歪み曲線（設計強度：30MPa）

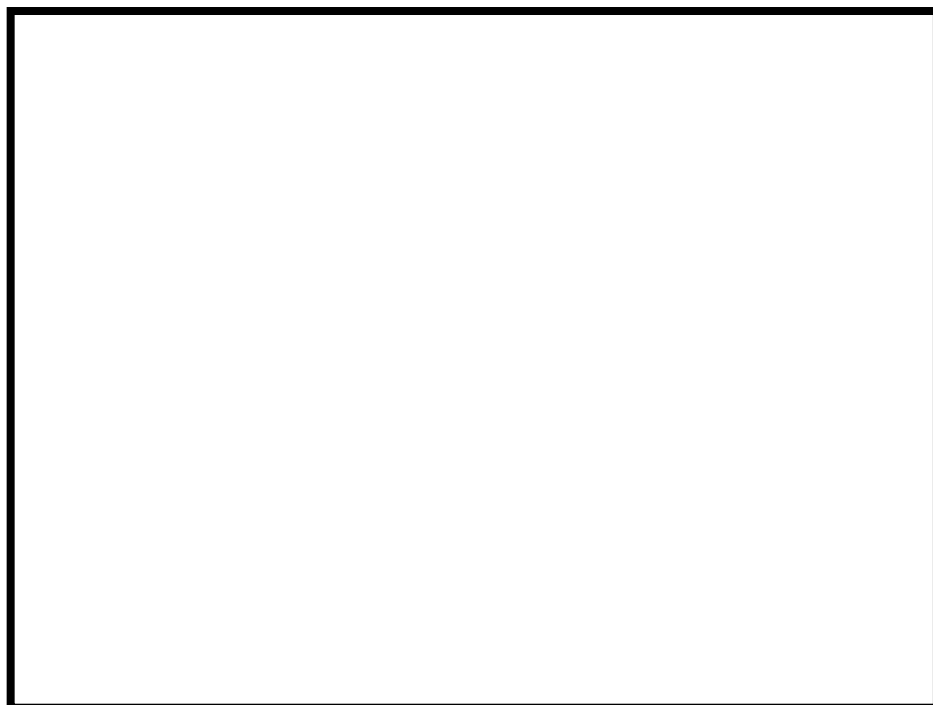


図 3-5 鋼板の応力歪み曲線

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

3.3.5 メッシュ分割

図3-6～図3-10に各部のメッシュ分割について示す。ペDESTALの構造応答の観点から、爆発荷重に対する変形挙動を精度よく模擬できるように、高さ方向及び壁厚方向に十分な分割数が確保できる寸法として要素幅 100 mm 程度で基本的な要素数を設定する。なお、LS-DYNAコードでは三次元の構造材を模擬するため、構造材の形状に則してより詳細な要素幅も考慮している。また、構造材に力を伝える流体（ALE 要素）のメッシュサイズは、ALE法を用いることを考慮し、境界面における伝達ロスが生じないように構造材（Lagrange要素）のメッシュサイズと同等とする。

以下に各要素のメッシュ分割例を示す。

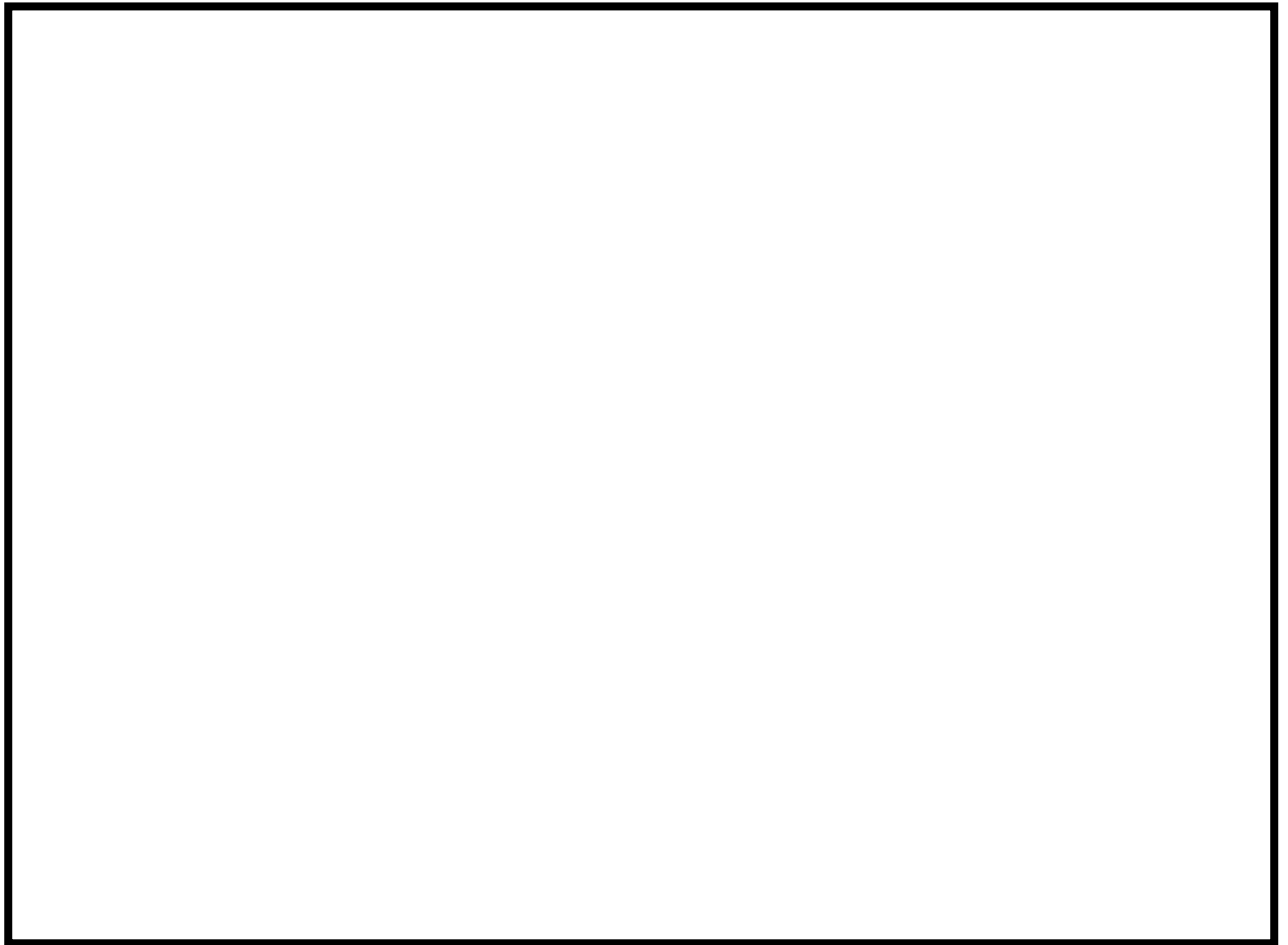


図3-6 コンクリート部のメッシュ例

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

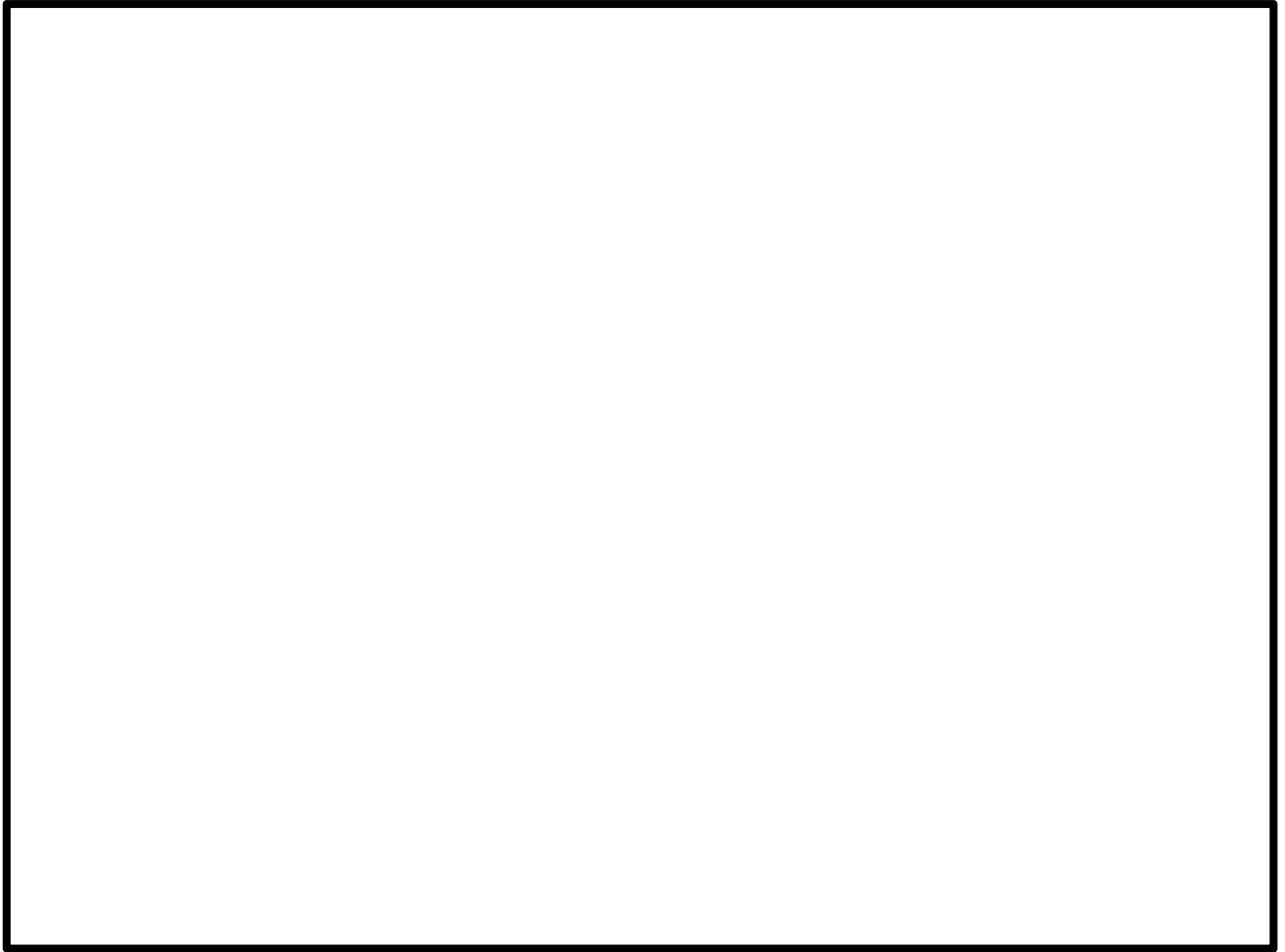


図 3-7 鋼板部のメッシュ例



図 3-8 爆発源のメッシュ例

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。



図 3-9 水相部のメッシュ例

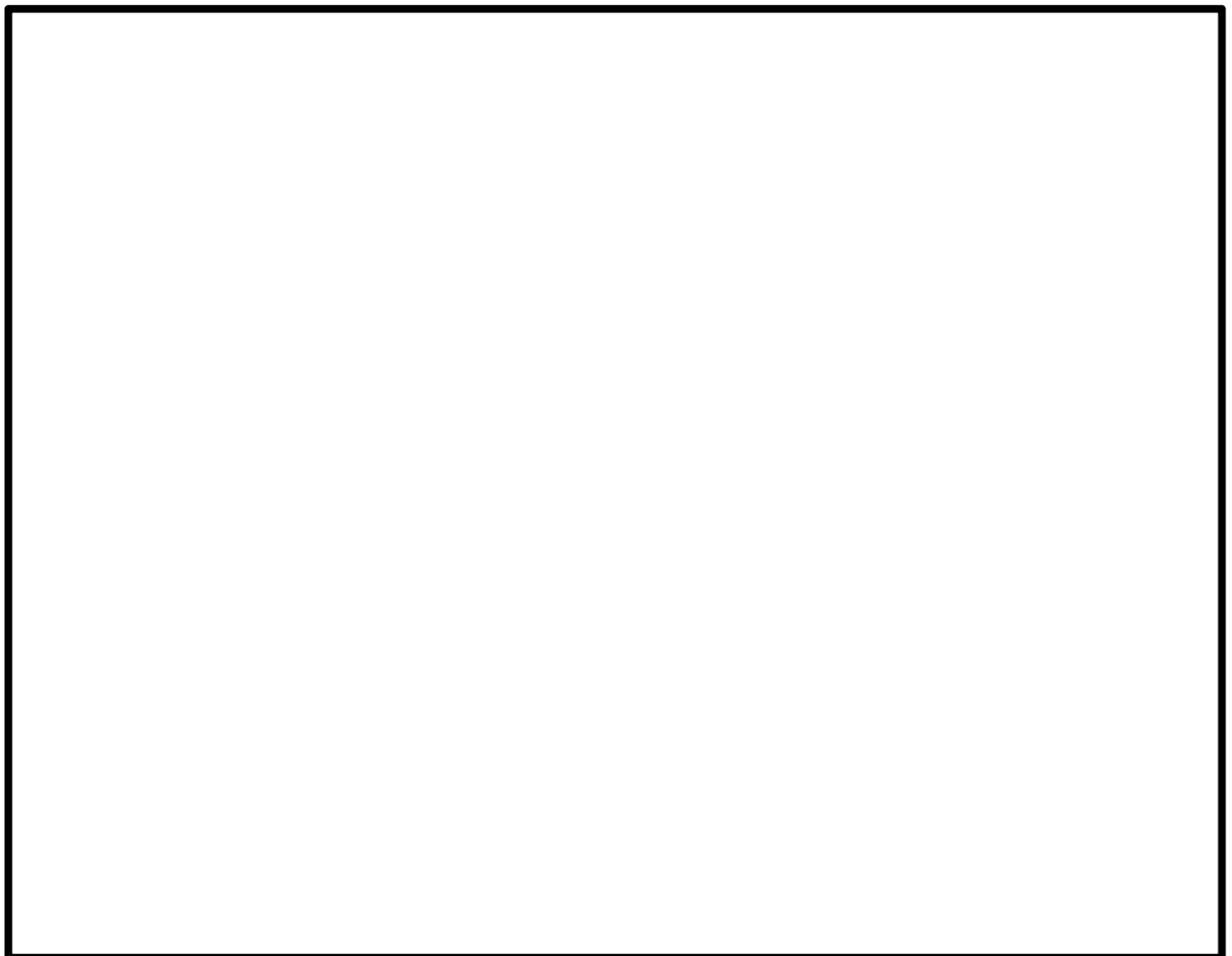


図 3-10 気相部のメッシュ例

3.4 爆発源の設定方法

爆発源の設定方法を以下に示す。

3.4.1 爆発源の形状

仮定する爆発源の形状は、JASMIN Eコードの解析による粗混合領域の分布形状に合わせて円柱状に設定する。下図 3-11 に粗混合領域の分布形状の例を示す。

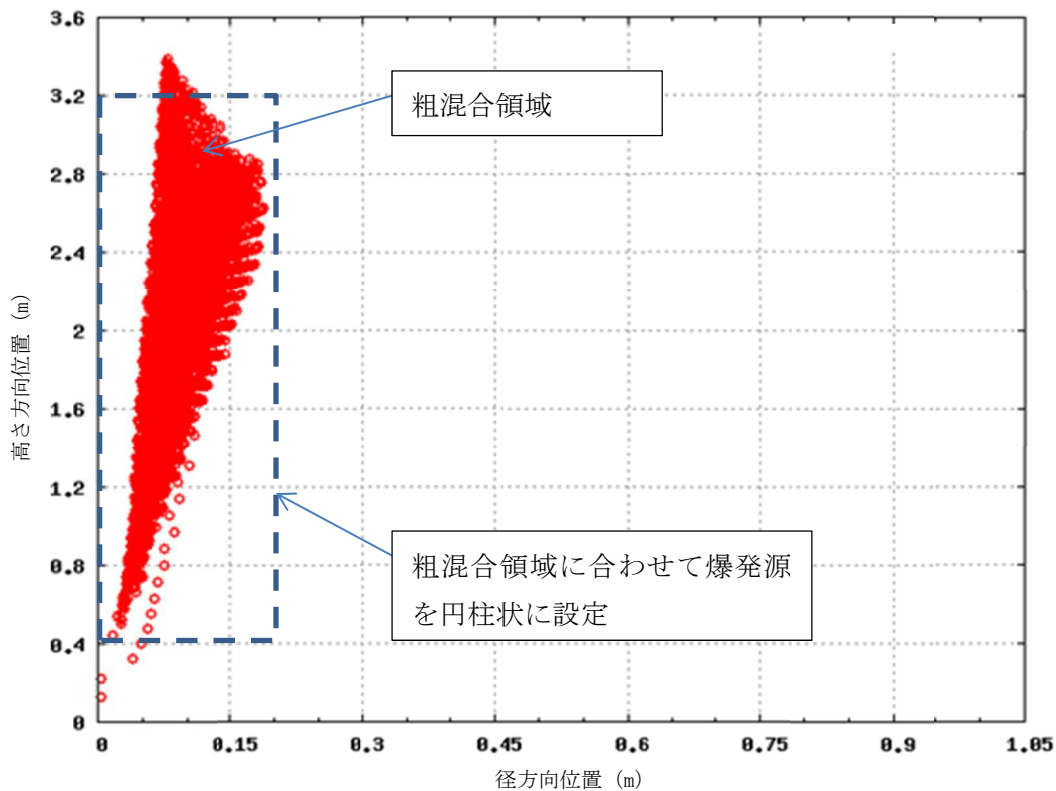


図 3-11 粗混合領域の分布形状の例

なお、粗混合粒子の分布が少ない領域は、爆発に大きく寄与しないため無視する。また、ポイド率が大きく、爆発に寄与しない上部領域も無視して設定している。

3.4.2 爆発源の圧力

実際の爆発は、起爆点より粗混合粒子が連鎖的に爆発していくため、爆発源領域の圧力履歴は、粗混合粒子位置により異なり、それぞれ個別の圧力ピークをとる。LS-DYNAコードにおいて、多数の爆発源が連鎖的に起爆する解析を模擬することは煩雑なため、

全爆発源領域で同時に爆発が発生すると仮定している。今回の評価では、各粗混合粒子位置の圧力履歴のうち、最大となった圧力値を全爆発源領域の初期圧力として設定する。下図 3-12 に粗混合領域の圧力履歴の例を示す。

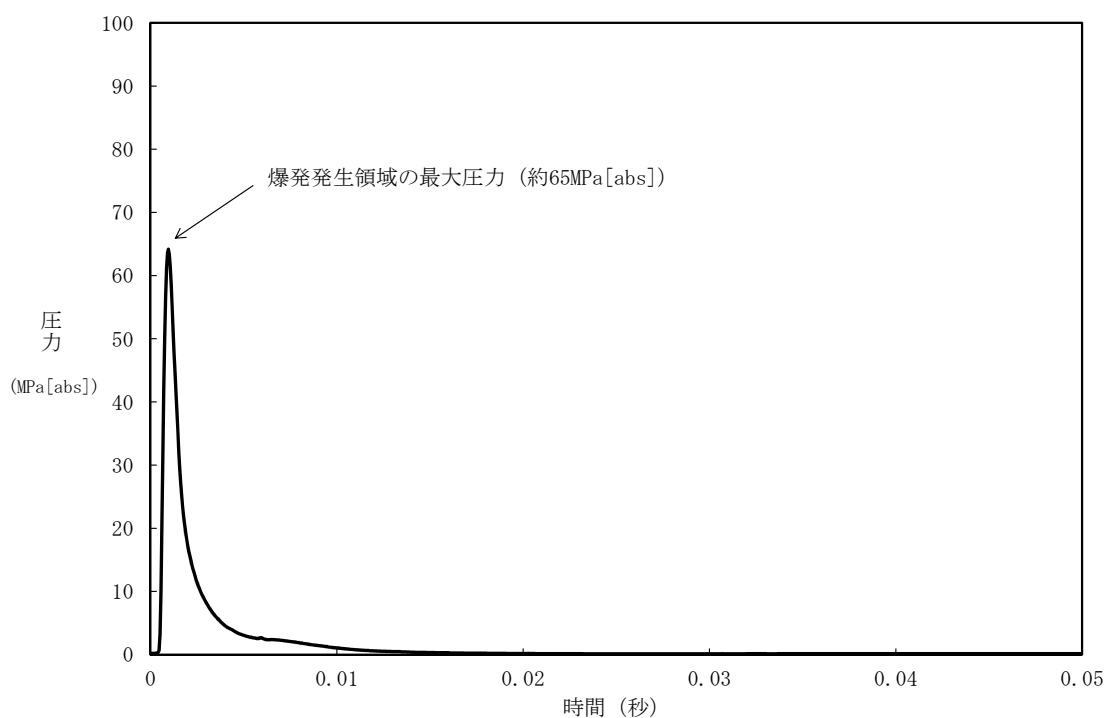


図 3-12 J A S M I N E 解析による粗混合領域の圧力履歴の例

3.4.3 爆発源の開放エネルギー

J A S M I N E コードの解析による流体の運動エネルギーは、L S - D Y N A コードで直接入力することはできない。そのため、今回の評価では、この流体運動エネルギーを再現するため、爆発源の開放エネルギーを適切に設定し、L S - D Y N A コードの解析結果としての流体運動エネルギーの最大値が J A S M I N E コードの解析の最大運動エネルギー相当となるよう調節している。これらの設定方法を図 3-13 に示す。

なお、この流体の最大運動エネルギーを保存する解析手法は、添付 1 に示す通り保守的な評価となる。

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

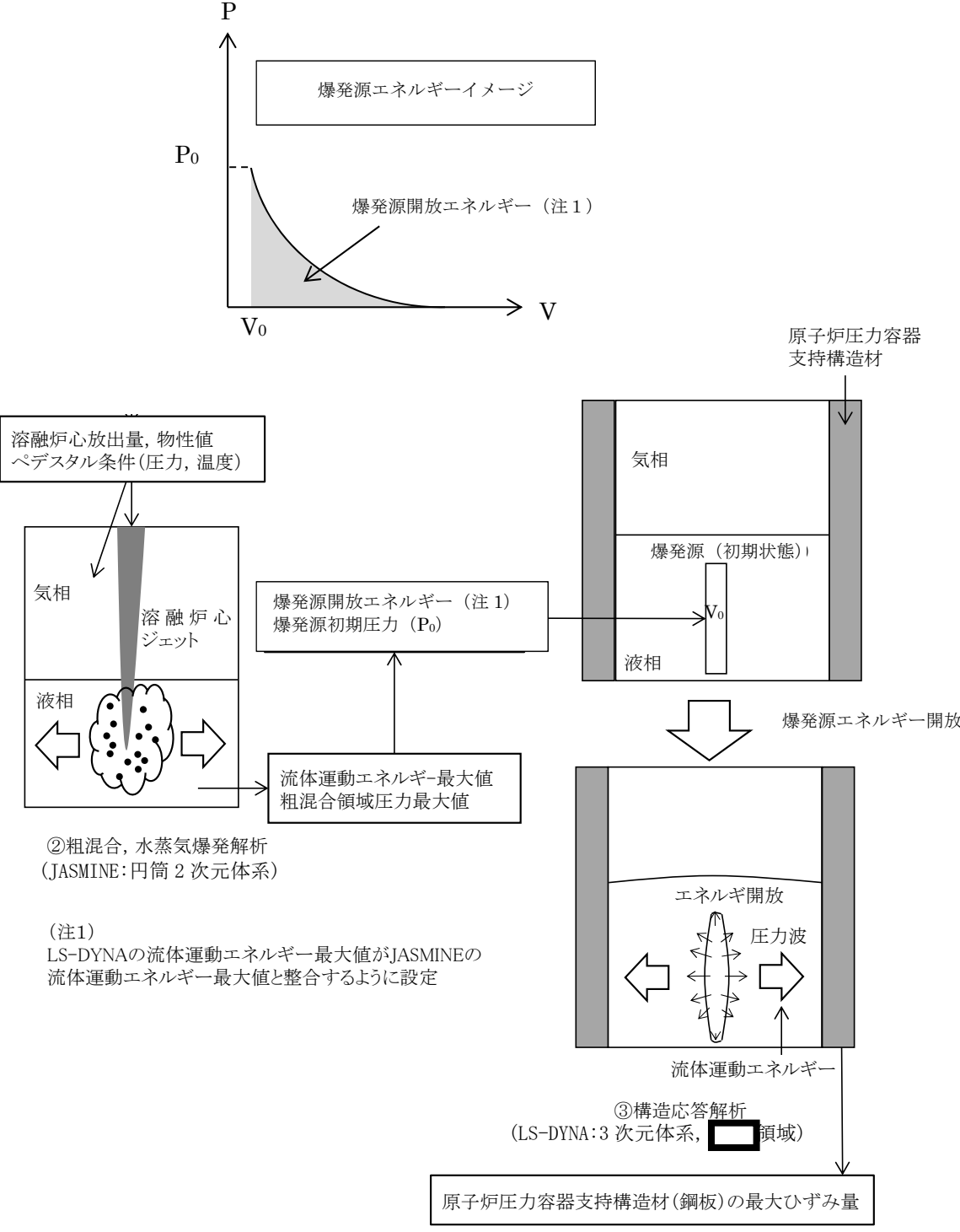


図 3-13 LS-DYNAコードにおける流体運動エネルギー設定方法

3.5 解析フロー

LS-DYNAコードの入力は、JASMIN Eコードの解析結果である粗混合領域の形状、爆発源の最大圧力、流体の運動エネルギーを入力条件として引き継ぎ、解析を実施する。なお、流体の運動エネルギーをLS-DYNAコードに直接入力することはできないため、爆発源の開放エネルギーを調節することで、JASMIN Eコードから出力される流体の運動エネルギーを再現している。

解析フローを図 3-14 に示す。

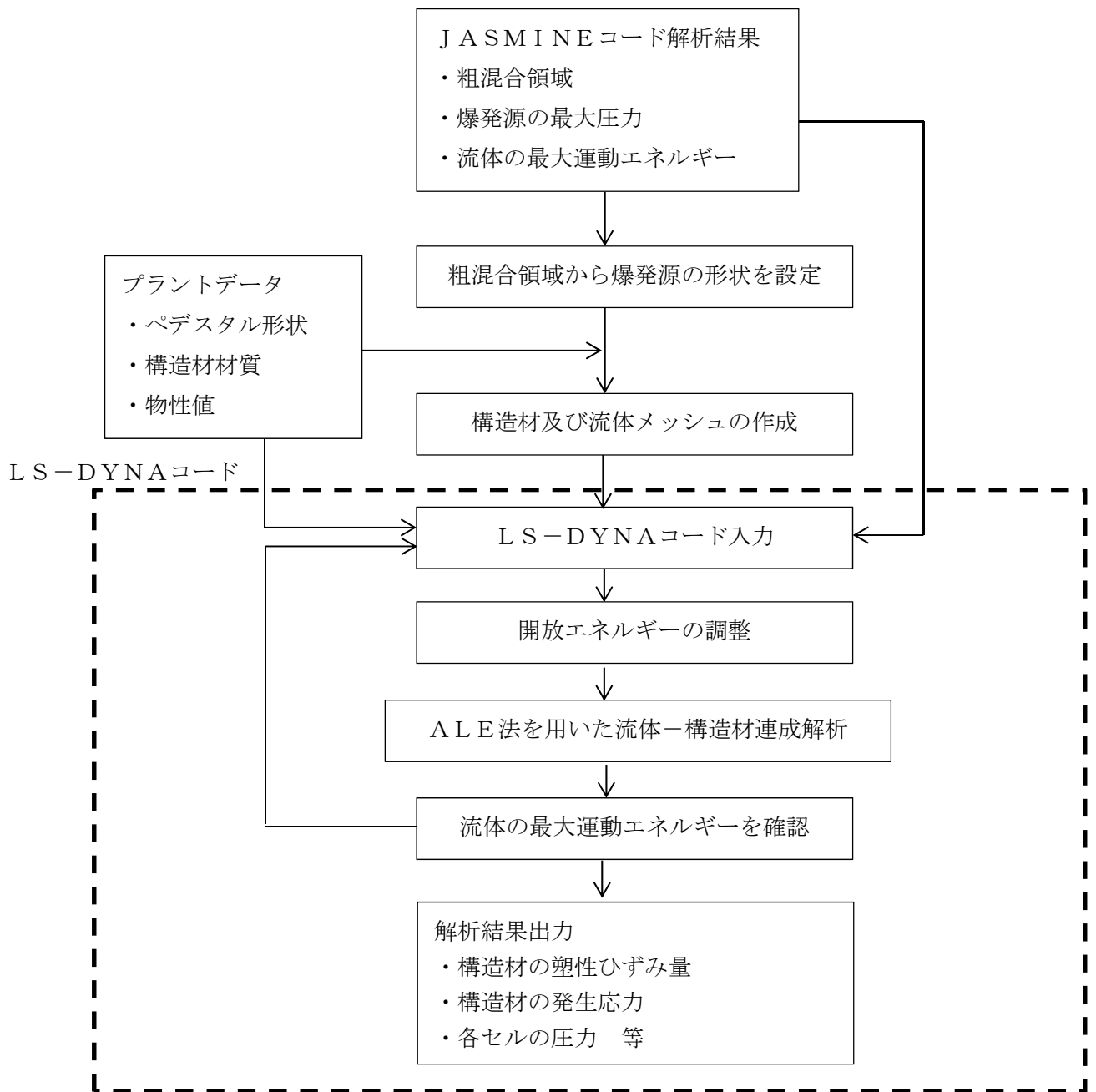


図 3-14 LS-DYNAコード解析フロー図

3.6 入出力

LS-DYNAコードの主要な入出力は図 3-14 に示した解析フロー図にも示されるとおりである。LS-DYNAコードのインプットデータは以下のとおり構成される。

- ① ペDESTAL構造物の幾何形状
- ② 各構造物に対する拘束条件
- ③ 構造物及び流体の物性値
- ④ 流体及び構造材のメッシュデータ
- ⑤ 流体及び構造材の要素タイプ
- ⑥ 爆発源の形状（JASMIN Eコードによる評価結果に基づく）
- ⑦ 爆発源の初期圧力及びエネルギー（JASMIN Eコードによる評価結果に基づく）

上記をインプットデータとして、水蒸気爆発発生時の構造材衝撃荷重応答を評価し、以下の主要なアウトプットデータを得る。

- ① 構造材の塑性ひずみ量
- ② 構造材の発生応力
- ③ 各セルの圧力

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

3.7 解析結果の例示

代表プラントの解析入力条件と解析結果について例示する。

(1) 解析モデル及び境界条件

LS-DYNAコードによる解析モデルについて図 3-15 に示す。この図に示す通り、気相部、液相部、爆発源、鋼板、コンクリート及び縦リブ鋼板を模擬している。拘束条件については、図 3-15 に示す△で示したコンクリートで埋設されている部分は全方位で拘束されているとし、△で示したペDESTAL頂部、液相底面（ペDESTAL床面）、気相頂部は、Z方向のみ拘束されているとした。

模擬する部位毎の要素タイプと要素数について、表 3-5 に示す。

表 3-5 要素分割の詳細

部位	要素	要素数
爆発源	ALE 要素 (Solid)	
液相	ALE 要素 (Solid)	
気相	ALE 要素 (Solid)	
コンクリート	Lagrange 要素 (Solid)	
鋼板	Lagrange 要素 (Solid)	

(2) 材料物性

代表プラントのペDESTALの構成材料（充填コンクリート及び鋼板）の密度、ヤング率、ポアソン比を表 3-6 に示す。また、これらの構造材の応力歪み曲線については、図 3-4 及び図 3-5 に示すとおりである。

表 3-6 ペDESTALの構成材料の物性値

材料	密度 (g/cm ³)	ヤング率	ポアソン比
充填コンクリート			
鋼板			

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

(3) 爆発源の条件

爆発源の仕様を表 3-7 に示す。

表 3-7 爆発源の仕様

項目	値	設定根拠
初期半径	[Redacted]	J A S M I N E コード解析結果の粗混合粒子の空間分布に基づいて設定
初期体積		
最大圧力 (初期圧力)		J A S M I N E コード解析結果の爆発源の最大圧力より設定
流体の運動エネルギー*		J A S M I N E コード解析結果の流体の運動エネルギーの最大値を再現する値を設定 J A S M I N E コード解析結果に基づく値

*) L S - D Y N A コードへの入力値ではなく、開放エネルギーの調整の結果として確認される

(4) 解析結果

(1) ~ (3) の入力条件に基づき、解析を実施した結果について、爆発発生から 0.01 秒後の内外鋼板の塑性ひずみの分布及び内外鋼板の発生応力が最大となる位置での応力の時刻歴を図 3-16 及び図 3-17 にそれぞれ示す。また、発生応力が最大となる時間での応力分布を内側鋼板及び外側鋼板について、図 3-18 及び図 3-19 にそれぞれ示す。

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

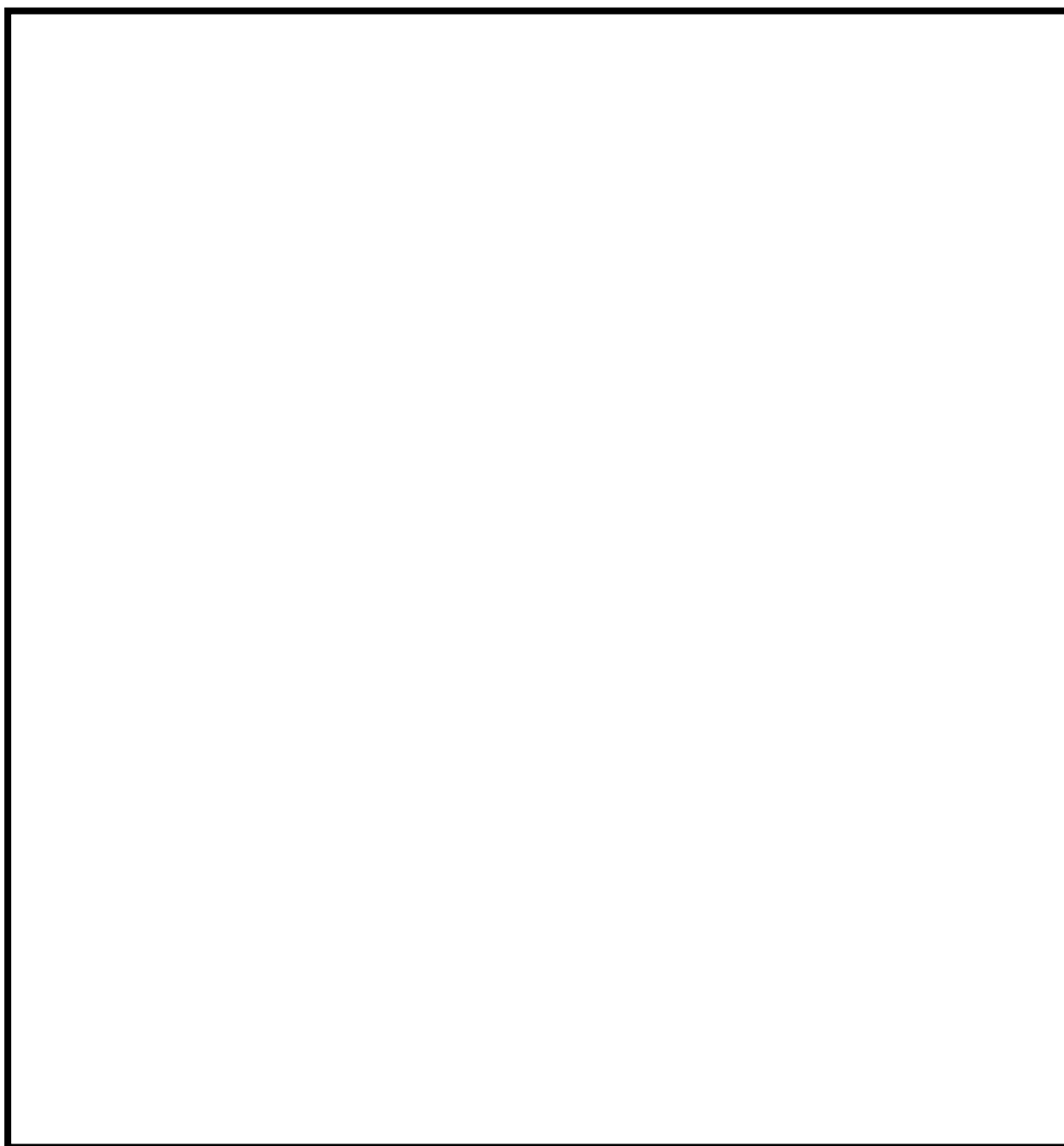


図 3-15 代表プラントのLS-DYNAコードの解析モデル

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

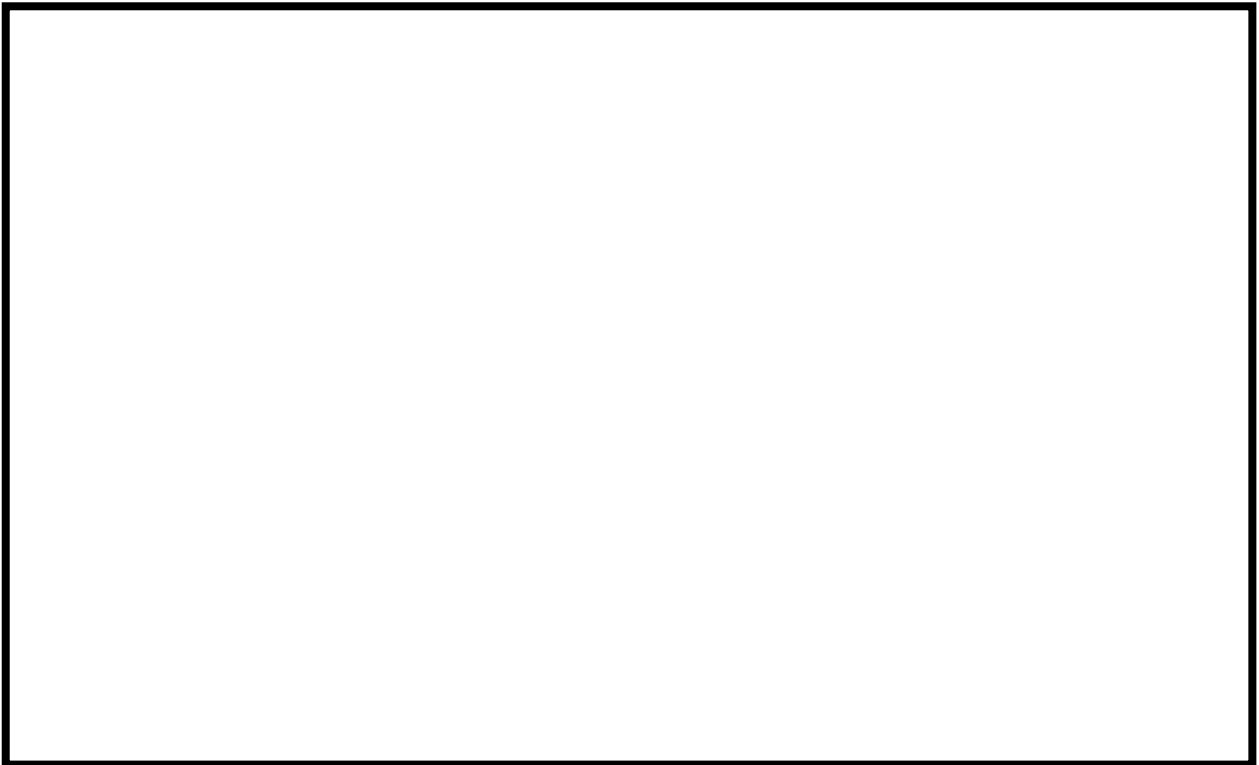


図 3-16 爆発発生から 0.01 秒後の内外鋼板の塑性ひずみの分布
(上：内側鋼板，下：外側鋼板)

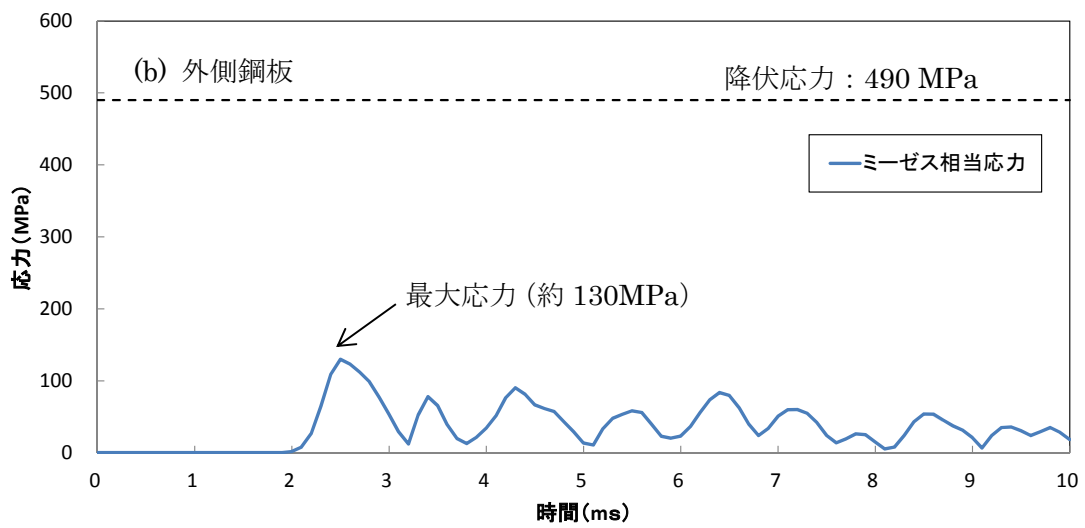
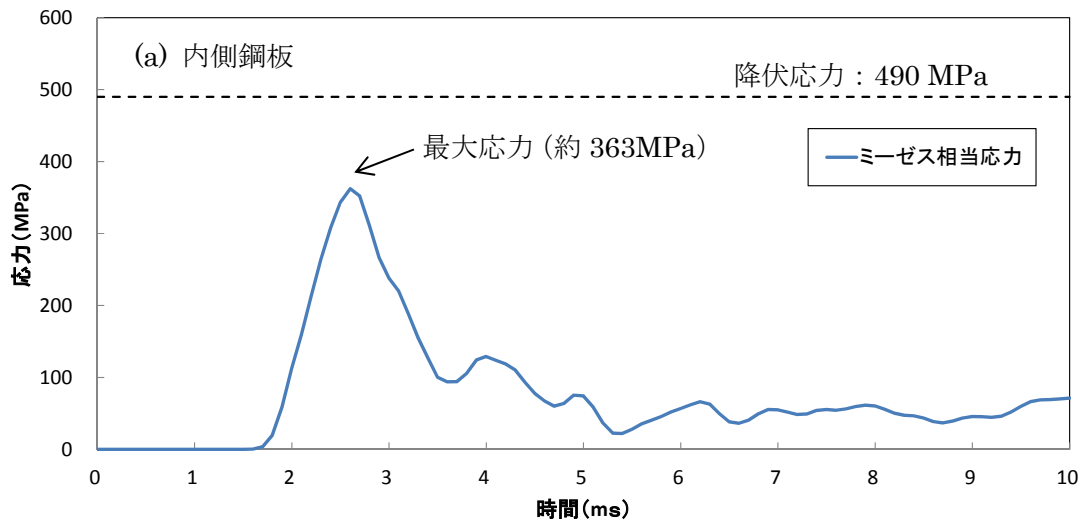


図 3-17 内外鋼板の発生応力が最大となる位置での応力の時刻歴
(上：内側鋼板，下：外側鋼板)

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

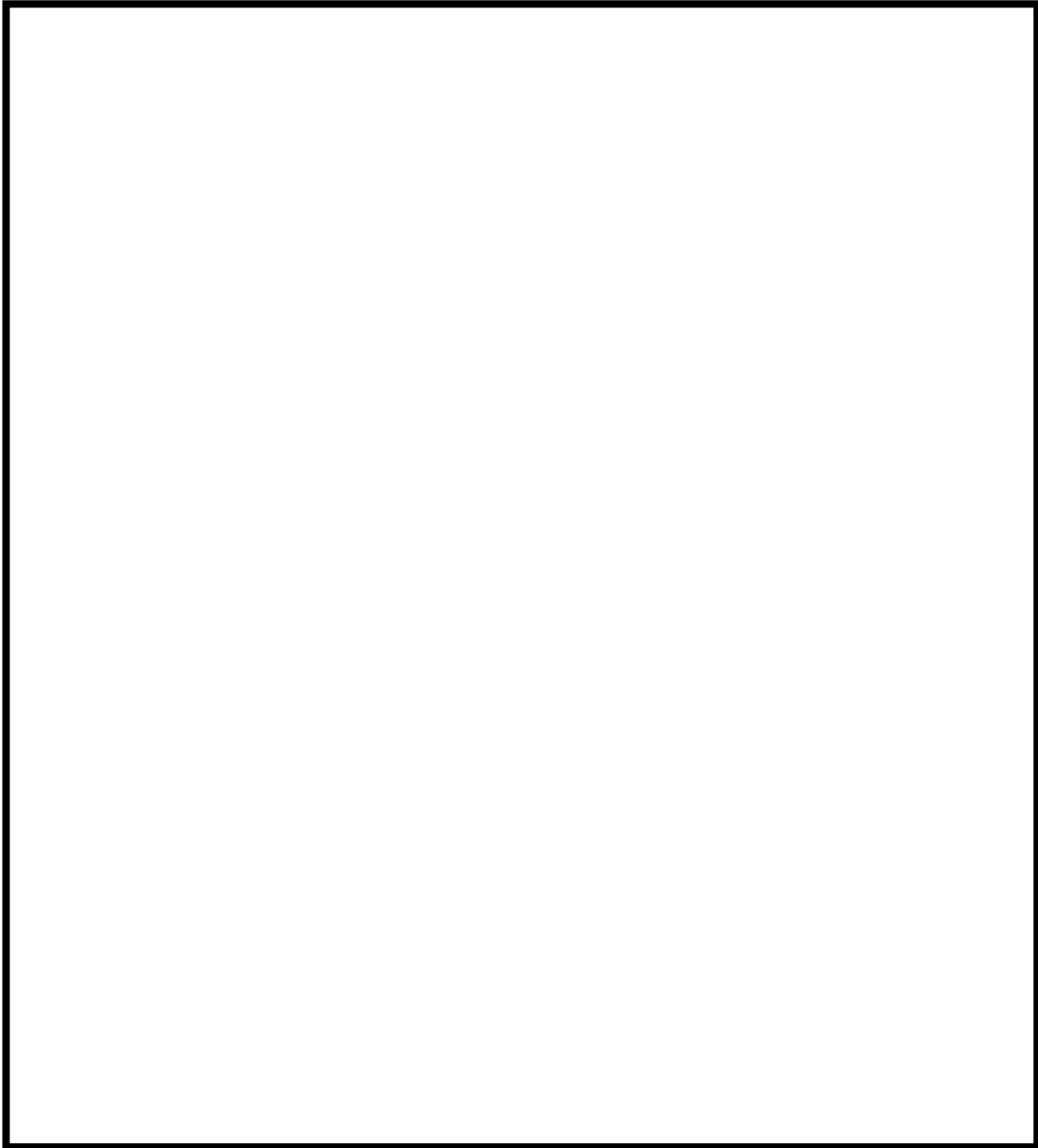


図 3-18 発生応力が最大となる時間での応力分布（内側鋼板）

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

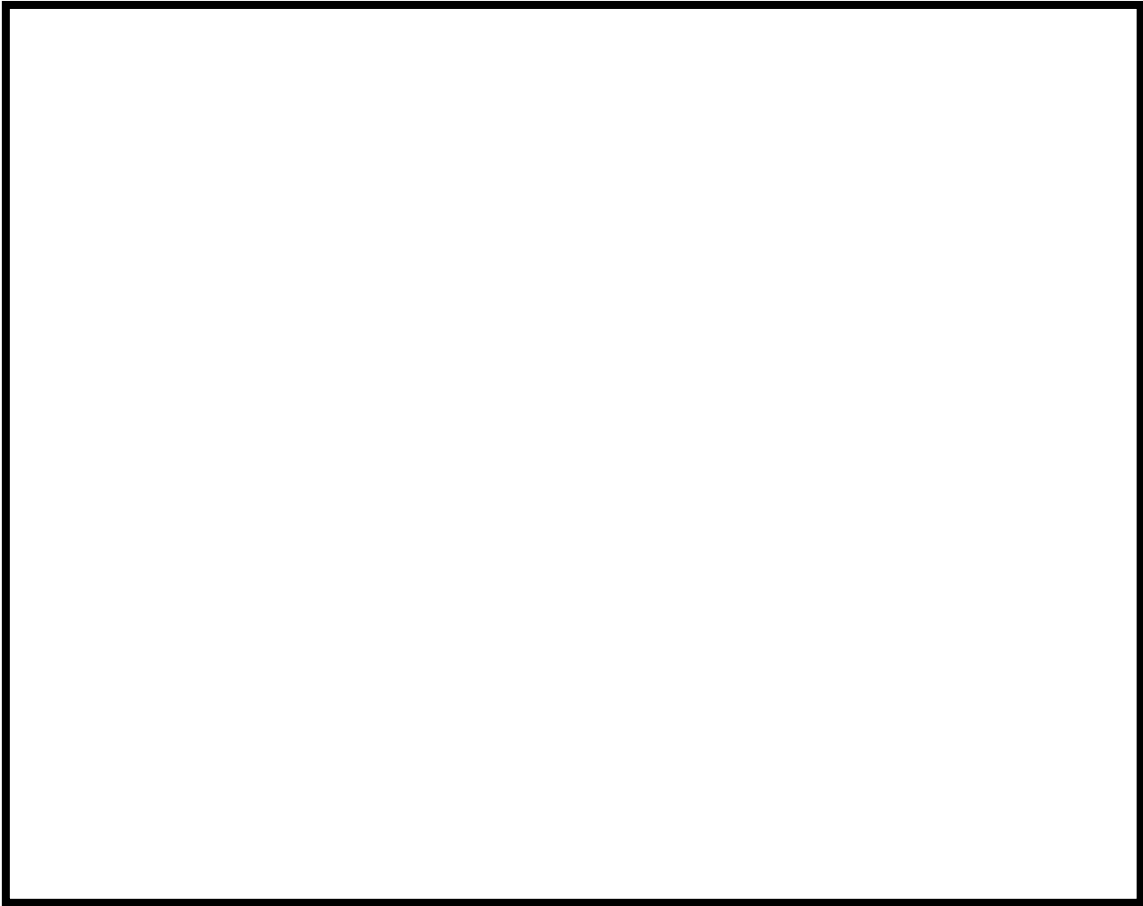


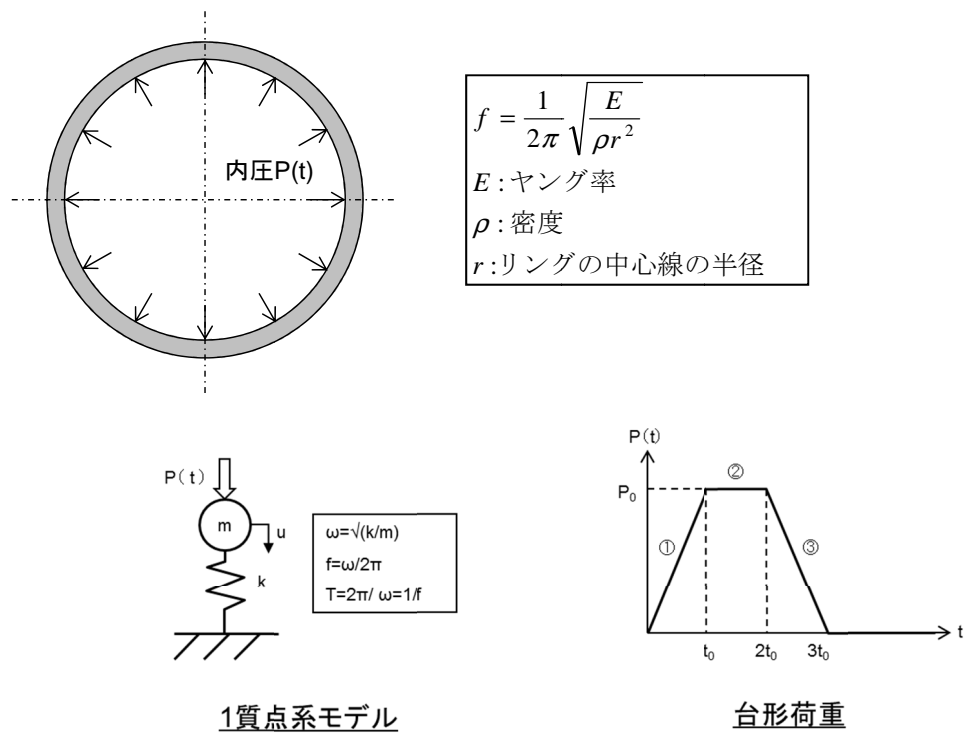
図 3-19 発生応力が最大となる時間での応力分布（外側鋼板）

4. 解析結果の検証

本章では、LS-DYNAコードを用いた解析解と理論解の比較検証結果を示す。LS-DYNAコードを用いたペDESTALの構造応答解析は、鋼板、放射状リブ及びコンクリート部を三次元ソリッド要素でモデル化して実施していることから、検証はペDESTAL構造とほぼ同形状をモデル化したソリッド要素とする。

(1) 理論解との比較

連続体要素を扱う動的解析の基本的な例題として、リング（円環）の面内振動を取り上げた。衝撃荷重が作用する構造物の応答では、図 4-1 に示すように構造物の固有周波数 f が大きく関係し^[6]、弾性範囲では図 4-1 に示されるような動的倍率（静的変位に対する倍率）の理論解が与えられる^[7]。



時間区分	荷重の式	動的倍率 (= 動的変位, u / 静的変位, δ_{st})
① $0 \leq t \leq t_0$	$P(t) = \frac{P_0}{t_0} t$	$\frac{u}{\delta_{st}} = \frac{t}{t_0} - \frac{\sin \omega t}{\omega t_0}$
② $t_0 \leq t \leq 2t_0$	$P(t) = P_0$	$\frac{u}{\delta_{st}} = 1 + \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$
③ $2t_0 \leq t \leq 3t_0$	$P(t) = \frac{P_0}{t_0} \cdot (3t_0 - t)$	$\frac{u}{\delta_{st}} = 3 - \frac{t}{t_0} + \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - 2t_0) + \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t \}$
④ $3t_0 \leq t$	$P(t) = 0$	$\frac{u}{\delta_{st}} = \frac{1}{\omega t_0} \{ \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega (t - 3t_0) + \sin \omega (t - 2t_0) - \sin \omega t \}$

図 4-1 衝撃荷重に対する応答（動的倍率）

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

図 4-2 に解析モデルを示す。リング形状は内半径 m, 外半径 m で解析モデルは対称性から 1/4 モデルとした。拘束条件としてリング周方向端部は鏡面对称, 径方向には自由で, 高さ方向は片側が固定されている。計算に用いた材料物性, 内圧の最大値は以下の数値を用いた。図 4-2 に示す圧力衝撃荷重履歴は, 最大圧力荷重を 1 としたときの荷重比の履歴として表している。

- 縦弾性係数 E : (MPa)
- 質量密度 ρ : (kg/m^3)
- ポアソン比 ν : (-)
- 内圧 P_0 : 1.0 (MPa)

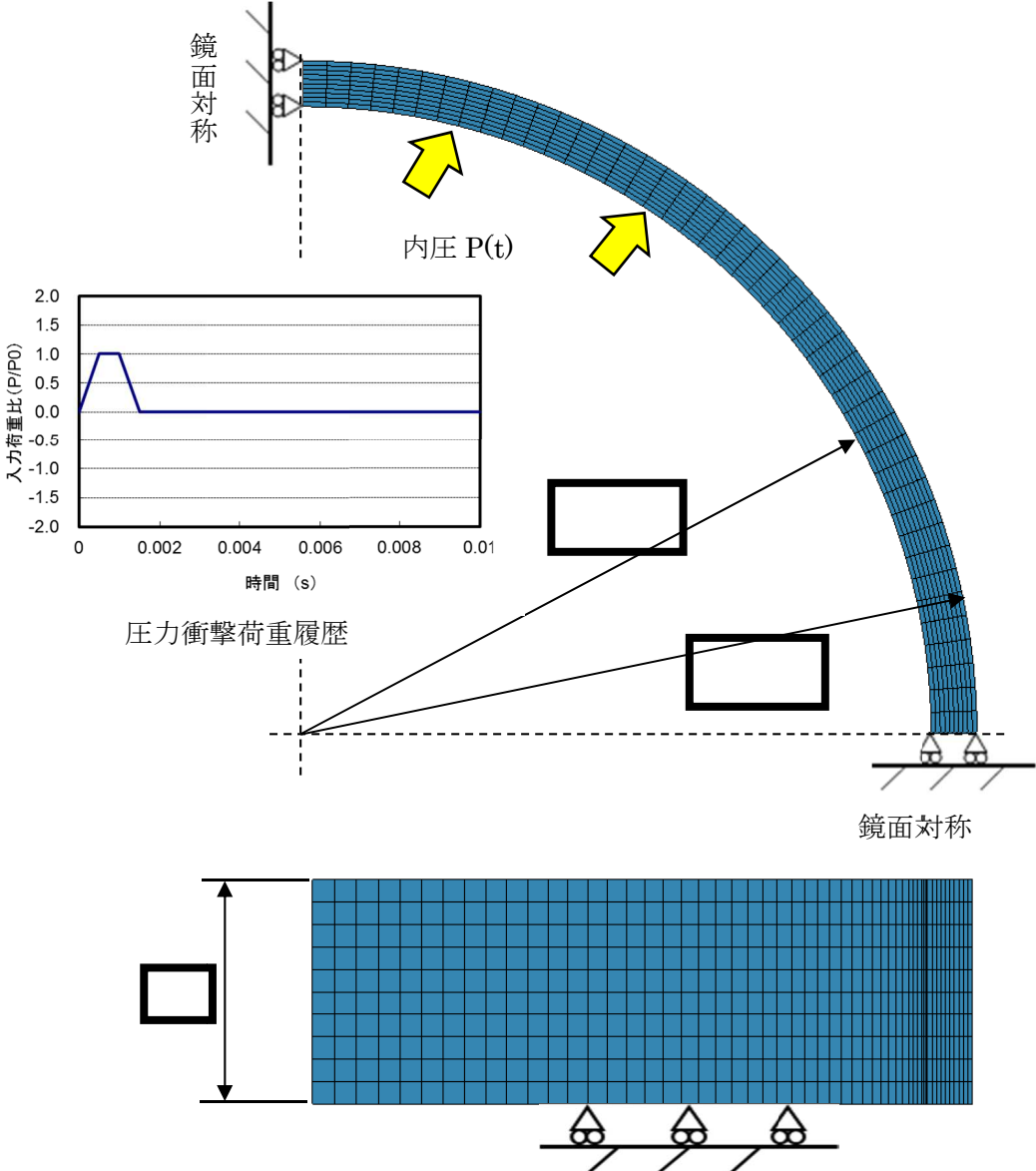


図 4-2 解析対象モデル

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

(a) 円形リングの面内振動の固有振動数

参考文献[6]より円形リングの固有振動数の理論解は、表 4-1 に示すように 283.80Hz である。

表 4-1 円形リングの固有振動数（理論解）

項目	
縦弾性係数 E (MPa)	
ポアソン比	
密度 (kg/m ³)	
固有周波数 (Hz)	283.80
周期 T (s)	3.52×10^{-3}

LS-DYNAコードの固有値計算値は、図 4-3 に示すように 283.37Hz であり、誤差 -0.15%で理論解と良く一致している。

LS-DYNA eigenvalues at time 1.00000E-0

Time = 283.37

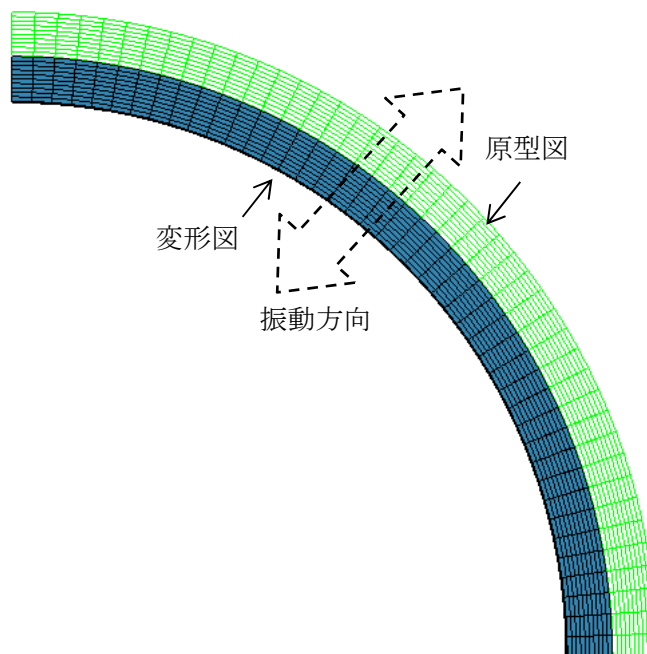


図 4-3 LS-DYNAコードの固有値解析結果
(径方向に振動する固有値モード)

(b) 台形荷重に対する応答

次に参考文献[7]による動的倍率の理論解と解析解を比較する。入力する衝撃荷重の条件を図4-2に示すような台形荷重で時間 t_0 は 0.5ms, 最大荷重 P_0 は 1[MPa]とした。理論解による最大動的倍率は 1.505 倍である。

LS-DYNAコードによる動的解析結果のリング内面位置での時刻歴変位を理論解とあわせて図4-4に示す。LS-DYNAコードの動的解析結果による最大動的倍率は 1.514 倍で、理論解との誤差 0.6%と良く一致しており、衝撃荷重に対する問題にLS-DYNAコードを用いることは妥当である。

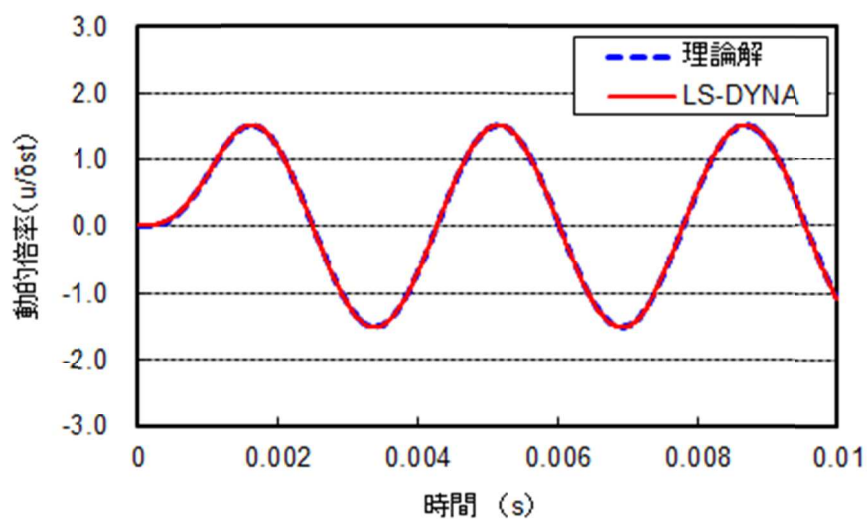


図 4-4 動的倍率の理論解とLS-DYNAコードによる解析結果の比較

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

(2) メッシュ分割の感度解析

今回の FCI 時の RPV ペDESTAL の構造評価では、構造体を模擬する Lagrange Solid 要素 (要素幅約 mm), 流体を模擬する ALE Solid 要素 (要素幅約 mm) を設定している。

ここで、設定したメッシュ分割が適切なのかを確かめるために、ペDESTAL 壁の一部を模擬した円環モデルにてメッシュ分割数の異なる二つのモデルに対して動的解析を行い、解析結果を比較した。図 4-5 に検討した円環モデルの概要、図 4-6 に解析結果の比較を示す。図 4-6 に示すように、FCI 時の設定した要素サイズ (モデル 1) と各要素辺長さを 1/2 とした詳細モデル (モデル 2) の内外壁面における径方向変位の数値誤差^{*)} は内外面で+4%, 周方向応力の解析結果の数値誤差は内面で+3%, 外面で+5%であり、解析結果に対して影響を与えるような大きな差は無く、メッシュ分割は妥当である。

*) 数値誤差の定義は、 $(\text{モデル1} - \text{モデル2}) / \text{モデル2}$

+ (プラス) は、モデル 1 の方が解析結果の数値が大きいことを示す。

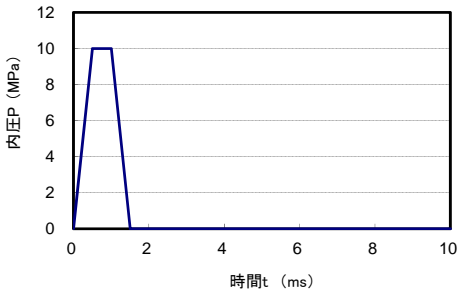
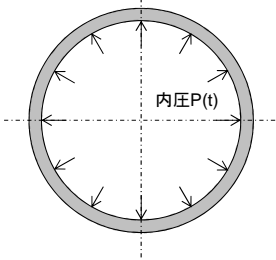
本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

検討した円環の概略寸法
 内径： ϕ [] m
 壁厚：t [] m
 高さ： [] m

検討した円環の物性
 ヤング率： [] Pa
 密度： [] kg/m³
 ポアソン比： []

	モデル1 (FCI 評価時と同等の 要素サイズ)	モデル2 (FCI 評価時の約 1/2 の 要素サイズ)
要素分割数	[]	
横断面	[]	
縦断面	[]	

荷重条件



FCI と同程度の荷重作用時間

図 4-5 要素サイズの比較検討に用いた円環モデルの概要

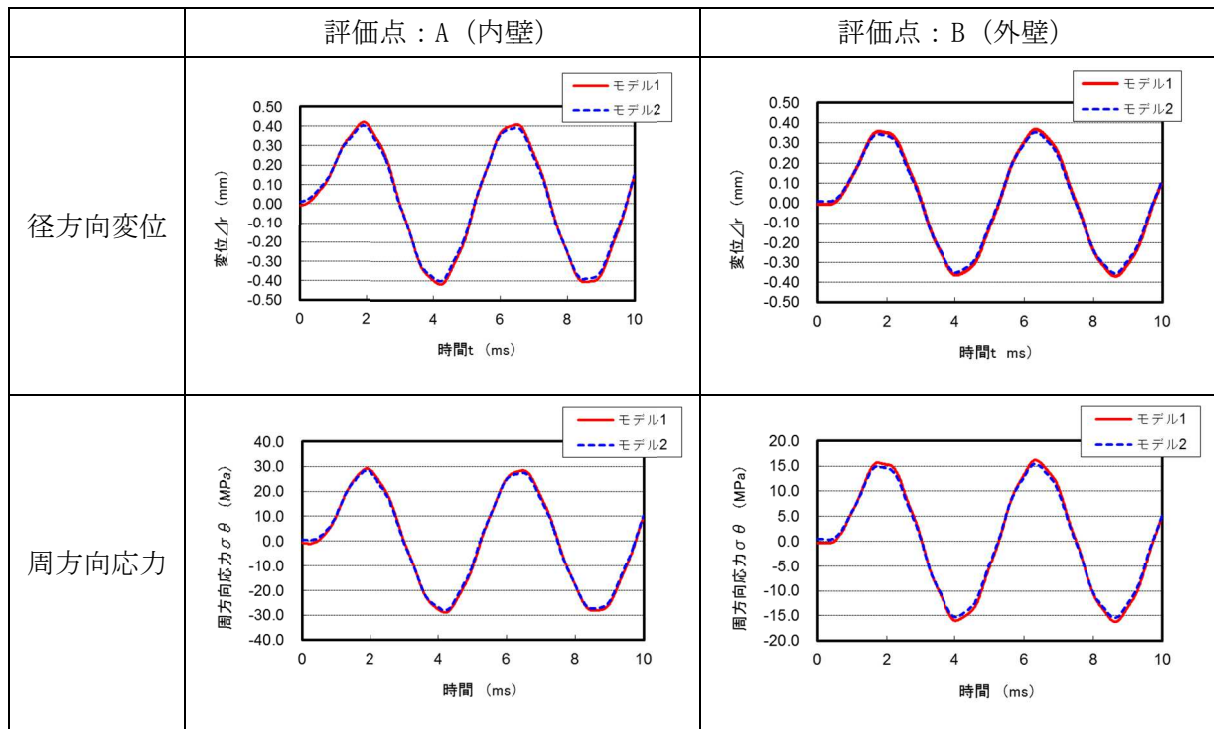
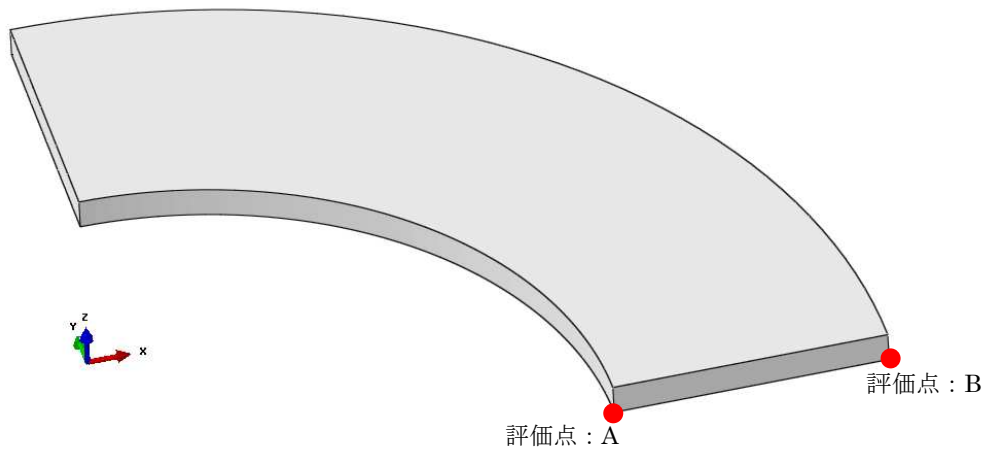


図 4-6 要素サイズの異なるモデルの動的解析結果の比較

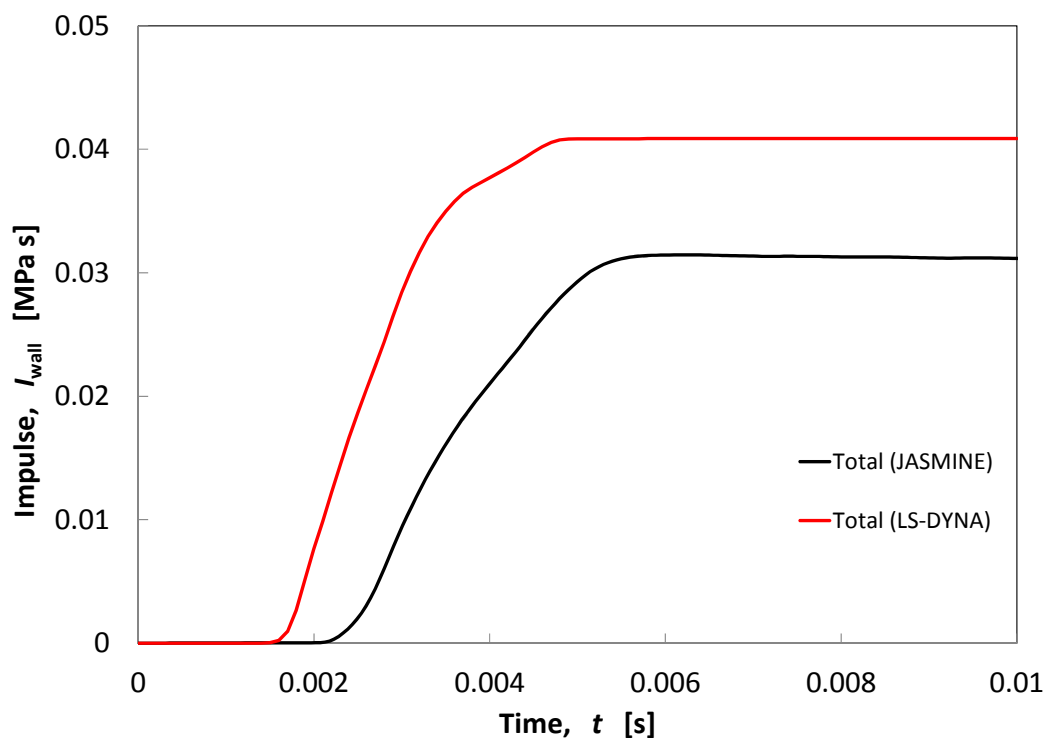
5. 参考文献

- [1] 「軽水炉シビアアクシデント時の炉外水蒸気爆発による格納容器破損確率の評価」, 森山他, 2007年11月, 日本原子力研究開発機構
- [2] S. W. Hong, P. Piluso, and M. Leskovar, 2013. Status of the OECD-SERENA Project for the Resolution of Ex-vessel Steam Explosion Risks, *Journal of Energy and Power Engineering*, 7, 423-431.
- [3] LSTC, “LS-DYNA Keyword User’s Manual”
- [4] 「BWR配管における混合ガス（水素・酸素）の燃焼による配管損傷防止に関するガイドライン（第3版）」, 平成22年3月, 日本原子力技術協会
- [5] 「原子力発電施設等に係る構造物の爆発衝撃荷重挙動解析」, 平成20年11月, 原子力安全基盤機構
- [6] 「新版 工業振動学」, チモシェンコ, pp.428 ~ pp.429, 1977年1月, コロナ社
- [7] 「基礎からの衝撃工学」, 石川, pp.86 ~ pp.87, 2008年3月, 森北出版

添付1 運動エネルギーから圧力として伝わる時の考え方について

3.4節に示したように、LS-DYNAコードの評価は、JASMINEコードの解析結果に基づき設定した水蒸気爆発時の流体の最大運動エネルギーに基づいて実施している。すなわち、LS-DYNAコードの評価での水蒸気爆発時の流体最大運動エネルギーがJASMINEコードの評価における全領域の流体運動エネルギーの最大値と同等となるように設定している。これは、水蒸気爆発発生時には溶融デブリからの熱エネルギーが、爆発による圧力波を介して流体側に運動エネルギーとして伝わりこれが構造材のペDESTAL壁に作用するためであり、この運動エネルギーの最大値を解析条件としてLS-DYNAコードの評価に引き渡すことにより、ペDESTALの構造健全性を適切に評価できると考えられるためである。

上記の考え方の妥当性を確認するために、JASMINEコードの解析による水蒸気爆発時の壁面力積履歴とLS-DYNAコードの解析における壁面力積履歴を比較した。下図に示すとおり、LS-DYNAコードの解析における壁面力積履歴はJASMINEコードの解析よりも大きく、解析条件として保守的であることが確認できる。



添付図 1-1 水蒸気爆発による壁面力積履歴の比較（女川2号機の例）

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

添付 2 反射波の考慮について

LS-DYNAコードは非線形動的構造解析ソフトウェアであり、時刻歴応答計算では陰解法を採用した有限要素法解析ツールとは異なり、収束計算を必要としない陽解法を採用しているため、特に爆発荷重・衝撃荷重のような非線形性の強い問題を扱うことが可能である。

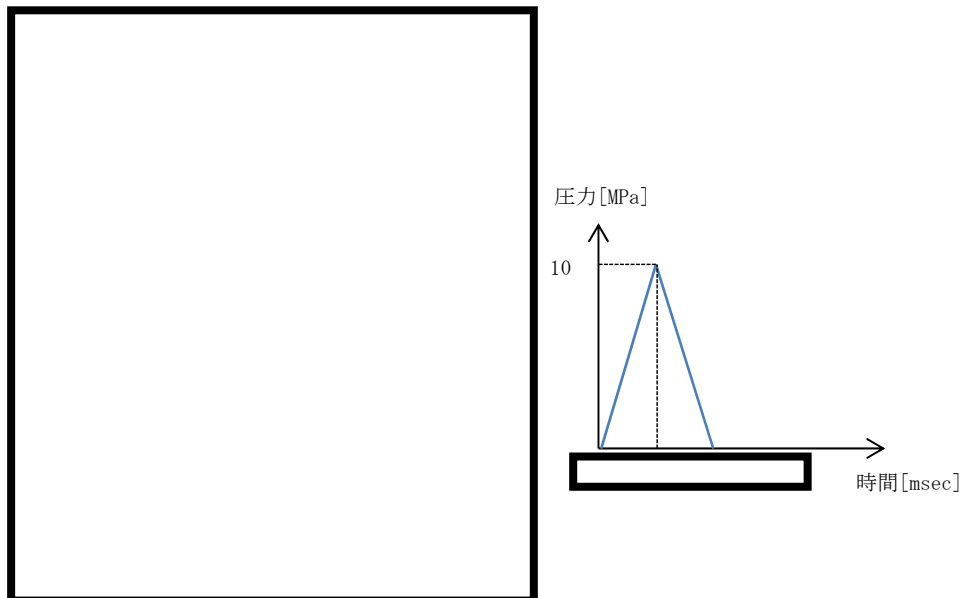
今回の FCI 時の RPV ペDESTALの構造応答は、構造体を模擬するラグランジュ要素（要素幅約 \square mm）と流体を模擬する ALE 要素（要素幅約 \square mm）を設定し、両者の相互作用による流体-構造連成解析によって計算している。

ラグランジュ要素の幅は、ペDESTALの構造応答の観点から、爆発荷重に対する変形挙動を精度よく模擬できるよう、壁厚方向に十分な分割数が確保できる寸法として設定したものである。一方、ALE 要素は、ラグランジュ要素との力のやり取りの関係からラグランジュ要素と同等の設定をすることが推奨されており、要素幅を \square mm と設定している。

なお、一般的に陽解法では、荷重等の伝播速度と要素サイズから自動的に時間刻みを計算することで、解析の精度を確保している。

したがって、今回の解析体系においても、要素サイズ、時間刻みは適切に設定されており、流体-構造間、及び構造体内部での圧力伝播や反射の影響については適切に模擬できているものと考えている。

ここで、反射波の影響確認を目的として、単純なラグランジュ要素のモデルにパルス状の荷重を負荷した場合の構造物内部の応力履歴を調査した。解析体系と荷重条件を添付図 2-1 に示す。

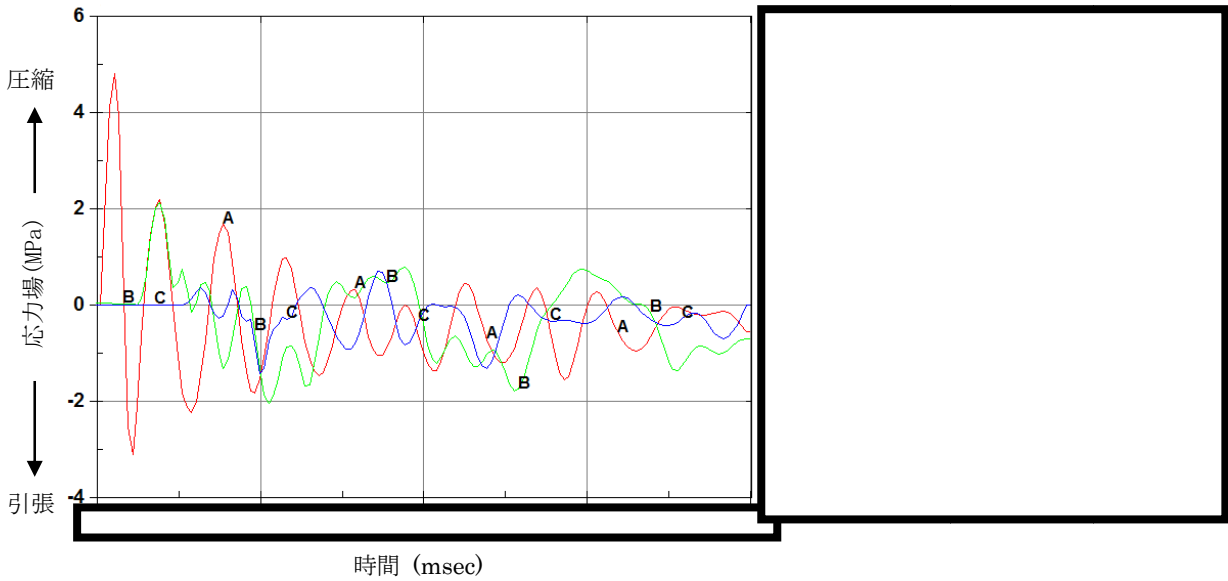


添付図 2-1 解析モデルと荷重条件

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

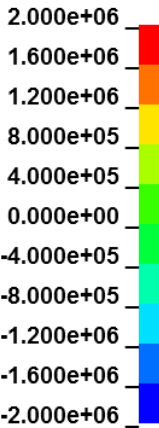
添付図 2-1 に示す条件で圧力波の伝播挙動を解析した結果として、代表点のラグランジュ要素の応力時刻歴を抽出した結果を添付図 2-2 に、時刻毎の応力分布を添付図 2-3 に示す。

添付図 2-2 に示す通り、圧力波の進行と反射の影響により、要素が受ける応力場の時刻歴は圧縮応力と引張応力が周期的に変動しており、境界面で圧力波の反射が考慮されていることを確認した。



添付図 2-2 ラグランジュ要素の代表点における応力場の履歴

応力場 (MPa)



リング内の音速 c は、 $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ より、
 $c=5082\text{m/s}$ であり、 0.01ms で約 50.8mm 進む。時刻歴の圧力ピークは、概ね音速 c で進行している。



添付図 2-3 応力場分布の推移

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。

添付3 ペDESTAL構造応答評価における判定基準について

1. ペDESTALの支持機能について

炉外 FCI の水蒸気爆発評価においては、爆発による衝撃荷重により、ペDESTALが圧力容器等を支持する機能を損なわないことが健全性の判断基準となる。

保守的な想定として、内側鋼板、コンクリート及び縦リブ構造材を無視し、ペDESTALの外側鋼板のみを考慮した場合の降伏強度について以下に評価する。

ペDESTALの外側鋼板の断面積は、

$$A_0 = \pi/4 \times (D_0^2 - D_i^2) = \boxed{} \text{ mm}^2$$

外側鋼板の降伏応力は、

$$S_y = 490 \text{ MPa}$$

よって、外側鋼板の降伏耐力は、

$$P_y = \boxed{} \text{ mm}^2 \times 490 \text{ MPa} = \boxed{} \text{ kN}$$

となる。一方、ペDESTAL評価箇所に加わる主な荷重としては、

- ① 圧力容器からの作用荷重 (約 $\boxed{}$ ton)
- ② 原子炉遮へい壁からの作用荷重 (約 $\boxed{}$ ton)
- ③ ペDESTALの基礎に直接作用する荷重 (約 $\boxed{}$ ton)

があり、鉛直方向の荷重は合計で約 $\boxed{}$ kN ($\boxed{}$ ton) である。したがって、外側鋼板のみでもペDESTALに加わる荷重に対して降伏することはない。

以上に示すように、ペDESTALの支持機能は外側鋼板のみで成立するため、炉外 FCI 時の水蒸気爆発評価においては、衝撃荷重によるペDESTAL外側鋼板の健全性への影響を確認する。

2. 許容ひずみについて

鋼板の健全性は、爆発荷重によって生じるひずみが許容ひずみ範囲内であることをもって確認する。

炉外 FCI 評価に用いるペDESTAL鋼板の許容ひずみは、材料データの既往知見 (NUPEC 試験^[1]) の最大荷重点でのひずみより 10%としている。以下ではその設定の考え方について示

す。

ペDESTAL鋼板の材質はSPV490である。SPV490のJIS規格では破断ひずみを19%以上である。これに対して、既往知見の一つであるNUPEC試験データにSPV490の最大荷重点でのひずみ10%がある。

ペDESTALの機能維持の観点からは、耐力が低下せず、外力の増加に対応できる範囲であれば荷重負担能力が維持できることから、FCI時の荷重に対して発生するひずみが最大荷重時ひずみ未満であることが機能維持の判定基準であると考えられることができる。このため、SPV490の最大荷重点でのひずみ10%を許容ひずみとして採用する。

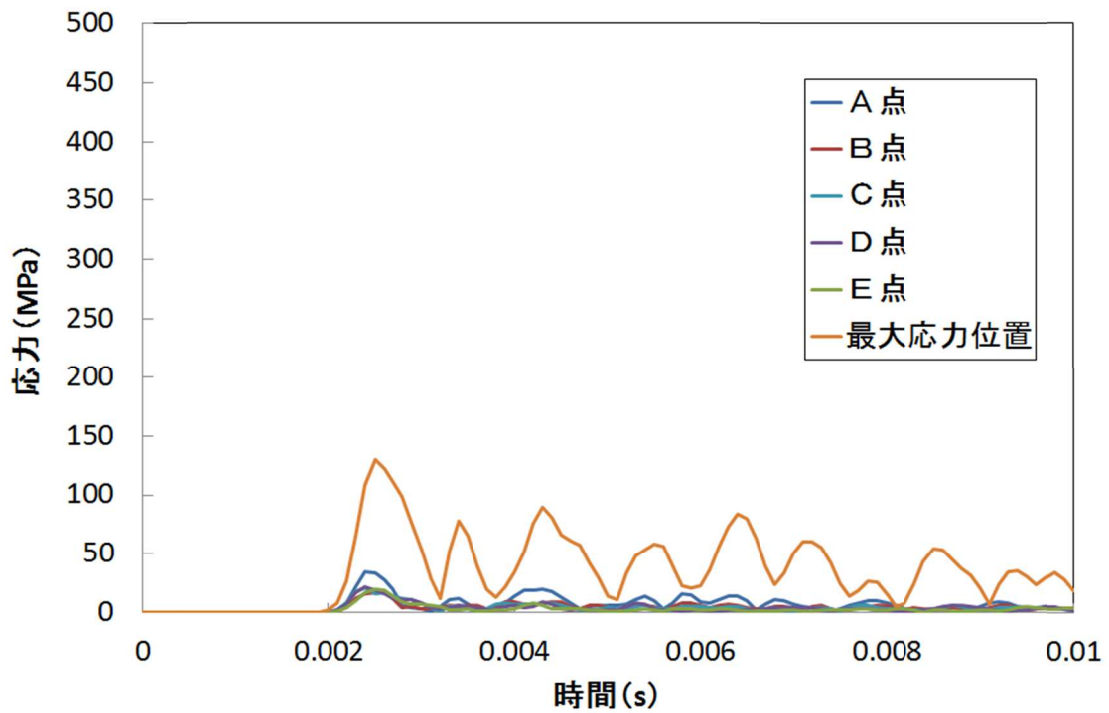
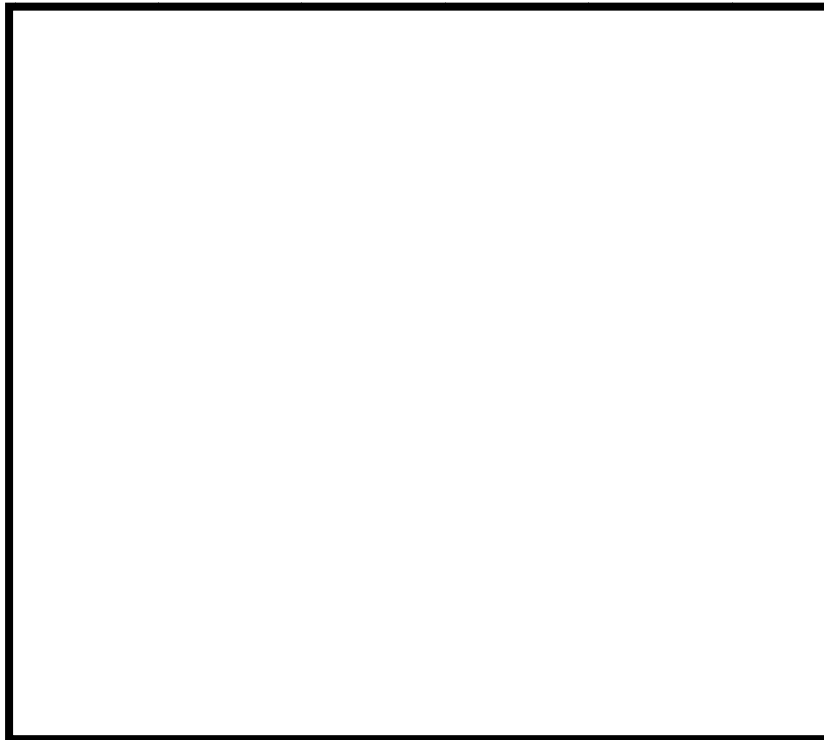
3. 代表的な解析結果と判断基準に対する傾向の確認

今回の評価結果では添付図3-1に示すように、外側鋼板の応力は最も厳しい局所位置においても約130MPaであり、鋼板の大半の領域では応力の最大値は30MPa程度である。このように、外側鋼板は炉外FCI時の水蒸気爆発荷重に対し、弾性変形の範囲内であるため塑性ひずみは生じず、降伏応力に対しても十分に余裕があることから、ペDESTALの支持機能としての健全性には影響がないと判断できる。

4. 参考文献

- [1] 「平成7年度 溶接部等熱影響部信頼性実証試験（原子炉格納容器）に関する報告書」，原子力安全基盤機構，平成8年3月

本資料のうち、枠囲み部分は商業機密に属しますので公開できません。



添付図 3-1 炉外 FCI 評価における外側鋼板の応力コンター図（最大応力発生時）
及び代表位置における応力履歴