

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.2

解析コード（AUTODYN）説明資料  
（参考資料）

平成 28 年 12 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

### AUTODYN

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.....	9
3.4	爆発源の設定方法.....	12
3.5	解析フロー.....	14
3.6	入出力.....	15
3.7	解析結果の例示.....	16
4.	解析結果の検証.....	24
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.....	添 1-1
添付 2	反射波の考慮について.....	添 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.....	添 3-1

## 1. はじめに

本資料は、格納容器破損防止対策に関する重大事故等対策の有効性評価（以下、「有効性評価」と称す。）に関連して、原子炉圧力容器外の熔融燃料－冷却材相互作用（以下、「FCI」と称す。）発生時における原子炉本体基礎（以下、「ペDESTAL」と称す。）の構造応答評価に適用する汎用衝撃解析コードAUTODYNを対象とし、

- ・適用対象事象及び適用実績
- ・解析モデルと解析結果についての説明
- ・解析結果の検証

に関してまとめたものである。

### (1) 解析コードの概要

AUTODYNは爆発・衝撃問題といった非線形時刻歴応答解析の専用ツールとして、1980年代に開発された解析コードであり、陰解法ソルバ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(\*)ソルバを採用しているため、爆発・衝撃のような非線形性の強い問題の解析に適している。

- (\*) 時刻歴応答解析には「陰解法」と「陽解法」の2種類の手法があり、陰解法は解を求めるために収束計算を必要とすることから、非線形性の強い問題の場合には解が発散して計算が継続できなくなる場合がある。一方、陽解法は収束計算の必要がないことから、比較的短時間で安定して解が得られる。

### (2) 解析コードの特徴

AUTODYNには後述する複数の要素タイプが用意されており、気体／液体／固体等の解析対象に応じた要素の使い分けや、異なる要素タイプ間での連成解析が可能である。

これにより、変形レベルの大きい流体部分と比較的変形レベルの小さい構造物部分の要素を使い分けてモデル化し、それらを連成させて計算することで、衝撃荷重を伴う流体－構造連成問題を解くことができる。

## 2. 適用対象事象及び適用実績

### (1) 事象の概要

AUTODYNによる構造応答解析は、原子炉圧力容器外でのFCIに伴う荷重に対して、ペDESTALの構造健全性を確認することを目的に実施する。

FCIとは熔融炉心と冷却材との接触及びそれに伴って引き起こされる現象を指し、FCIのうち衝撃波を伴うものを「水蒸気爆発」と呼ぶ。

これまでの研究では、水蒸気爆発現象を以下のような段階的な過程によって説明するモデルが提唱されている。

- ① 炉心あるいは原子炉圧力容器から落下する熔融炉心（デブリジェット）が冷却材中に落下する。水と接触した熔融炉心は、その界面の不安定性により細粒化して水中に分散する（エントレイン）。細粒化した熔融炉心（以下、「デブリ粒子」と称す。）は、蒸気膜に覆われた状態で膜沸騰を伴う水との混合状態となる（粗混合）。
- ② 上記の状態では、自発的もしくは外部からの圧力パルス等の外乱により、膜沸騰が不安定化し（トリガリング）、デブリ粒子と冷却材が直接接触する。
- ③ デブリ粒子と冷却材の直接接触により急速な熱の移動が発生し、急速な蒸気発生・熔融炉心の微細化によってさらにデブリ粒子と冷却材の接触が促進され（伝播）、蒸気発生が促進される。この蒸気発生により圧力波が発生する。
- ④ 発生した圧力波が通過した後の高温高圧領域（元々は粗混合領域）の膨張により運動エネルギーが発生し、構造材に機械的荷重が作用する。

上述の通り、水蒸気爆発が発生するためにはトリガリングが働く必要があり、さらにデブリ粒子と冷却材の接触が瞬時に粗混合領域全体に伝播する必要がある。

一方で、国内外の実験的知見に基づく評価において、BWRの実機条件下では水蒸気爆発のトリガとなり得る要因は考えられないことから、水蒸気爆発の発生可能性は十分に低いものと結論付けられている。

本書にて説明するAUTODYNを用いた構造応答解析では、仮に水蒸気爆発が起こった場合を想定し、最も爆発による影響が大きいペDESTALの構造健全性を確認する。

水蒸気爆発に伴う荷重条件については、上記①～④の事象を解析コードJASMIN Eを用いて解析的に模擬し、算出する。（詳細は3.4参照）

(2) 適用実績

高速衝突や爆発問題などを対象とする高速衝撃解析に用いられる計算コードは、ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL) によって 1950 年代に開発された HEMP コードを起源としている。HEMP コードをはじめとする、それまでの多くの衝撃解析コードは有限差分法によって定式化されていたが、その後、DYN A を代表とする有限要素法衝撃解析コードが開発され、さらに計算処理能力の向上を背景として、1980 年代に商用衝撃解析コードとして AUTODYN が開発された。

AUTODYN は、高速衝突問題や爆発問題をはじめとした、物質の大変形を伴い、かつ非常に過渡的な現象に対して有効なコードである。また、多くの衝撃解析コードと同様、連続体力学によって定式化され、質量、運動量、エネルギーの各保存形式と、連続体の特性を表す状態方程式及び構成方程式が陽解法によって連立して解かれる。

AUTODYN は、例えば航空宇宙分野にて、スペースデブリ衝突、複合材の衝撃応答、燃料タンクの安全評価に適用されている。また、前述の通り爆発・衝撃問題に適したコードであるため、FCI によるペDESTAL 構造材への荷重応答評価にも適しており、既往研究において適用した実績もある。この中で、代表的な研究概要を表 2-1 に示す。

表 2-1 AUTODYN の主な適用実績

1	研究名称	シビアアクシデント時構造バウンダリ健全性評価 ＝動的構造応答解析＝
	解析実施者	財団法人 原子力発電技術機構 原子力安全解析所
	実施時期	平成 12～13 年度 (平成 12 年度は「環境影響評価手法の調査検討等」の一部として実施)
	研究概要	PWR プラントにおける炉心損傷後の格納容器破損防止対策 (格納容器内注水) の有効性評価として、FCI 現象を模擬した解析を実施。水中での熔融炉心の粗混合反応の解析は VESVIUS コードを用い、ガスバグモデルを用いた AUTODYN 2 次元モデルによる応答解析に加え 3 次元モデルによる解析も実施。熔融物のエネルギー放出挙動に関しては、代表的な FCI の試験である KROTOS 試験の結果を参照している。
2	研究名称	コンクリート建造物の衝撃破壊挙動解析に係るコード整備
	解析実施者	独立行政法人 原子力安全基盤機構
	実施時期	平成 15 年度
	研究概要	コンクリート建造物に対する航空機衝突の影響を評価するためのコンクリート構成則の改良及び検証解析を実施。低速域から高速域にわたる複数のコンクリート実験の再現解析を AUTODYN で行い、解析結果との良い一致を得た。

### 3. 解析モデルと解析結果の例示

AUTODYNは非線形時刻歴応答解析の専用ツールであり、陰解法ソルバ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ソルバ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。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AUTODYNの使用実績としては、航空宇宙・防衛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  $\Delta_e$ ）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（ $\Delta_t$ ）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体の場合、ヤング率  $E$ 、密度  $\rho$  とすると、構造体内での音速  $c$  は、

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

連続体が流体の場合、体積弾性率  $K$ 、密度  $\rho$  とすると、流体内部での音速  $c$  は、

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

である。F C I 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 3200 m/s、水中で 1560 m/s、空気中で 340 m/s である。

AUTODYNでは、時間積分の刻み幅  $\Delta_t$  としてすべての要素で決定される時間積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

AUTODYNで使用可能な要素タイプの種類とその概要を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 AUTODYNで使用可能な要素タイプの種類とその概要

要素タイプ	概要
Lagrange (Solid)	物質とともに要素が移動・変形する計算方法。主として固体に対して適用性がある。
Shell	薄板 Shell 要素。厚さ方向に要素分割できないような薄肉構造物に対して適用性がある。2次元軸対称系の場合は計算領域を線分（2次元）の集合に分割する。
Euler	要素は空間に固定され、この要素間を物質が移動する計算方法。主として気体・流体に対して適用性がある。本解析では複数の物質を取り扱うことができる Multi-Material Euler 法を適用している。
ALE (Arbitrary Lagrange Euler)	物質とともに要素が移動・変形する Lagrange において、内部セルに対しては物質とは別に要素を任意に移動させて、要素の歪みによる計算精度の低下を防ぐことができる。

今回の F C I 時の構造応答解析では、AUTODYNで使用可能な上記の要素タイプのうち、Lagrange、Shell 及び Euler を用いている。

ここで、Lagrange 要素及び Shell 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、高さ方向及び壁厚方向に十分な分割数（曲げ変形を適切に模擬する観点から壁厚方向に最低3分割）が確保できる寸法として設定する。一方、Euler 要素は、Lagrange 要素との力のやり取りの関係から Lagrange 要素よりも小さく設定することが推奨されていることに配慮し、設定する。

F C I時の構造応答解析に用いる解析モデルの例を図 3.1-1 に、当該モデルの要素分割の例を図 3.1-2 にそれぞれ示す。

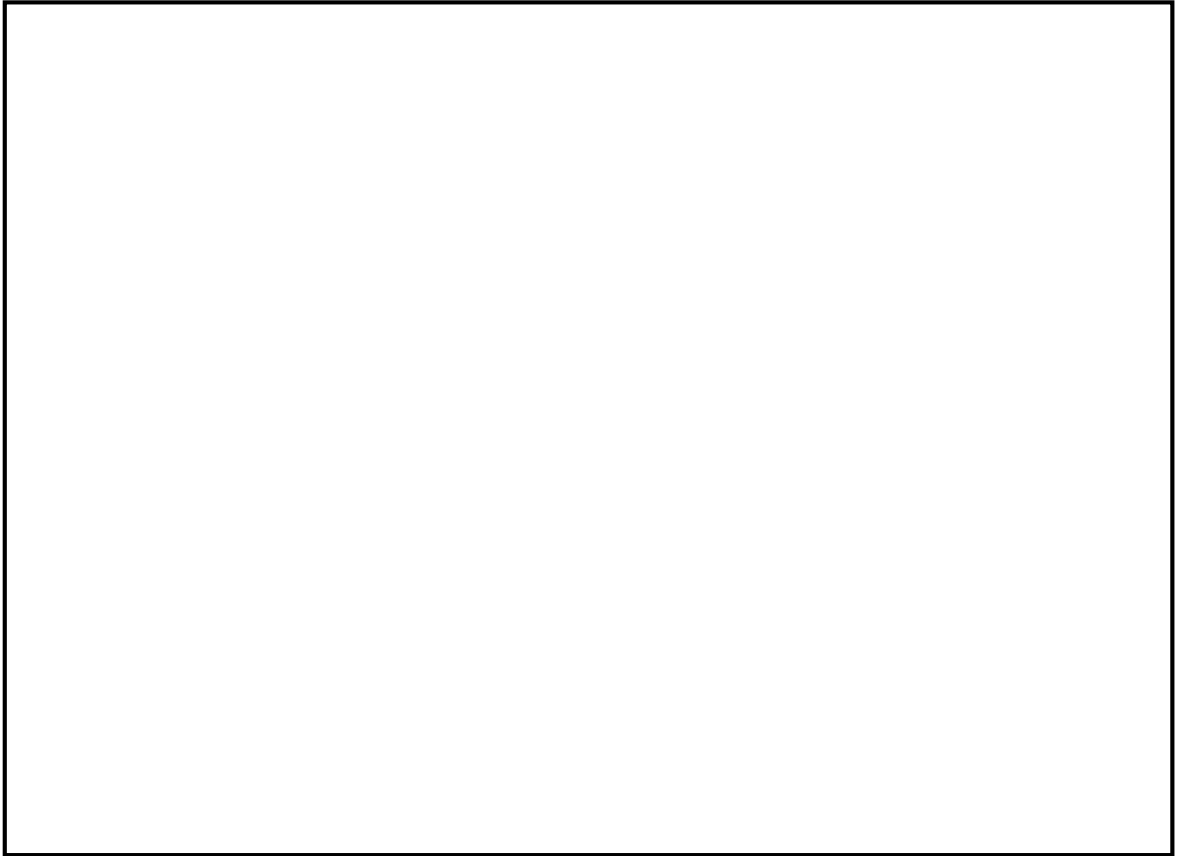


図 3.1-1 解析モデル図



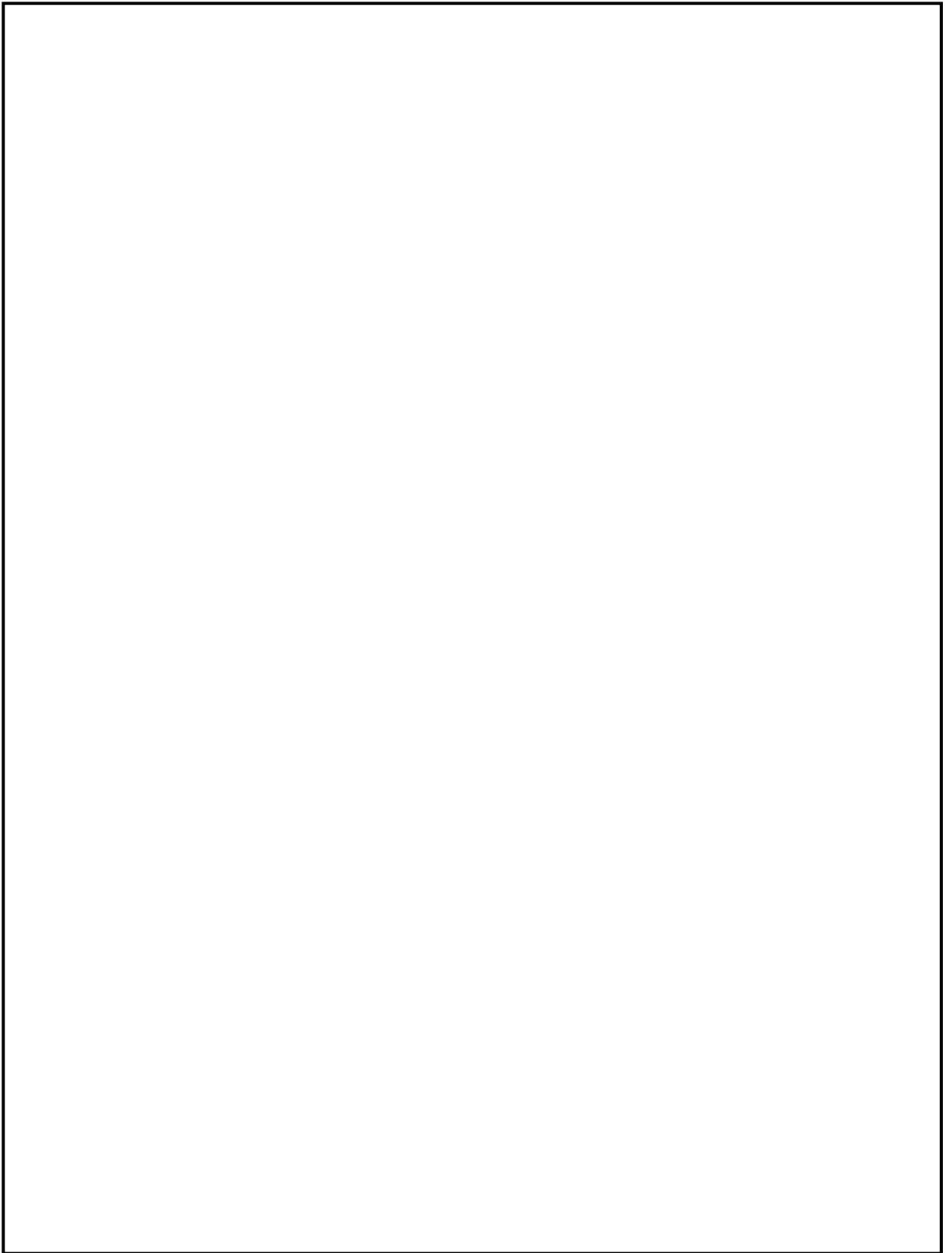


图 3.1-2 要素分割图

### 3.2 境界条件

ペDESTALは原子炉圧力容器を支持する構築物であり、鋼板製の内筒・外筒からなる二重円筒構造である。実機には内筒と外筒の間に等間隔に縦リブが配置されており、これら内筒、外筒及び縦リブの鋼材部分を強度部材として設計している。また、内筒、外筒及び縦リブで区切られた領域にはコンクリートが充填されている。

解析は2次元軸対称モデルを用い、気相部、液相部、爆発源、鋼板部及びコンクリートをモデル化している。なお、当該モデルは2次元軸対称体系であるため、縦リブ鋼板及び人員アクセス用の開口等は模擬していない。

ペDESTALは基部の格納容器との取り付け部を介して、原子炉圧力容器等から作用する荷重を基礎マットに伝達する構造であることから、格納容器との取り付け部を完全固定境界とする。ペDESTAL内及びペDESTAL外の領域にはコンクリート床等の周辺構造物が存在するが、保守的に変形を大きく評価する観点から、これらの周辺構造物による拘束効果は考慮しない。また、ペDESTAL上部に作用する原子炉圧力容器の自重等による荷重の効果についても上記と同様の理由により、考慮しない。

境界条件を示した解析モデル図を図 3.2-1 に示す。



図 3.2-1 解析モデル図

### 3.3 材料モデル

AUTODYNでは、物質の材料特性を「状態方程式」「構成則」「破壊則」のモデルで定義している。それぞれの概要は以下の通りである。

状態方程式：熱力学的平衡状態における静水圧と内部エネルギーと密度の関係を示す。

構成則：せん断応力とひずみの関係及び／または降伏基準を示す。

破壊則：物質の破断基準を示す。

以下に本解析における構造部材の材料特性を示す。

#### (1) 鋼板

表 3.3-1 に鋼板の材料特性を示す。表 3.3-1 の設定に基づき、解析にあたっては個別プラントの鋼板の密度、体積弾性率、横弾性率、降伏応力及び限界相当塑性ひずみを入力する。

表 3.3-1 鋼板の材料特性

項目	設定
状態方程式	線形
構成則	等方硬化則
破壊則	限界相当塑性ひずみ則
密度	個別プラントの値
体積弾性率	
横弾性率	
降伏応力	
限界相当塑性ひずみ	

(2) コンクリート

表 3.3-2 にコンクリートの材料特性を示す。表 3.3-2 の設定に基づき，解析にあたっては個別プラントの鋼板の密度，体積弾性率，横弾性率等を入力する。

表 3.3-2 コンクリートの材料特性

項目	設定
状態方程式	線形
構成則	Drucker-Prager
破壊則	スポール破壊
密度	個別プラントの値
体積弾性率	
横弾性率	

ここで，本解析ではコンクリートの衝撃解析で一般的な構成則として Drucker-Prager 構成則を用いる。

この構成則における降伏応力は，圧力の関数として一般的に式(1)のように表される。

$$Y = ap + b \quad (\text{ただし } a, b \text{ は定数}) \quad (1)$$

ただし， $Y$  が無限に大きくなることを避けるために上限値  $Y_{\max}$  を定める。(式(2)及び図 3.3-1 参照)

$$Y = \min(Y_{\max}, ap + b) \quad (2)$$

ここで，定数  $a, b$  は下式で与えられる。

$$a = \frac{3(n-1)}{n+2} \quad (3)$$

$$b = \frac{3}{n+2} f_c \quad (4)$$

$$n = \frac{f_c}{f_t} \quad (5)$$

ここで， $f_c$  及び  $f_t$  は以下の通り。

$f_c$  : コンクリートの圧縮強度

$f_t$  : コンクリートの引張強度であり，下式で計算する。

$$f_t = 0.23 \times f_c^{2/3} \quad (6)$$

また,  $Y_{\max}$  は次式で与えられる。

$$Y_{\max} = c + f_c \tan \phi \quad (7)$$

ここで,

$$c = \frac{\sqrt{n} \cdot f_t}{2} \quad (8)$$

$$\cos \phi = \frac{2\sqrt{n}}{n+1} \quad (9)$$

$$\sin \phi = \frac{n-1}{n+1} \quad (10)$$

上述の計算式と, 個別プラントのコンクリートの圧縮強度  $f_c$  に基づき, 式(2)の降伏応力と圧力の関係を求め, AUTODYNのインプットとする。

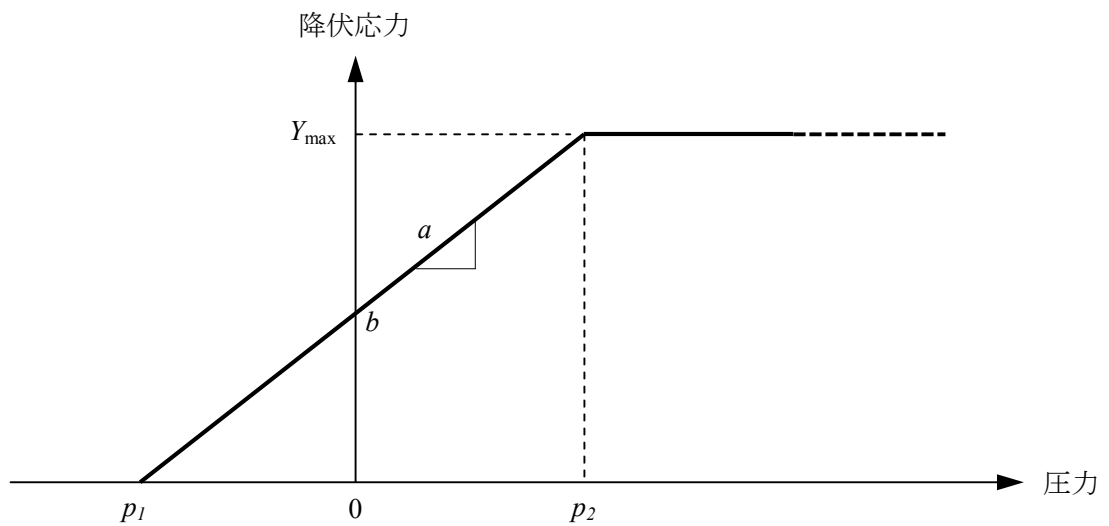


図 3. 3-1 Drucker-Prager 構成則の降伏応力-圧力関係の概念図

### 3.4 爆発源の設定方法

水蒸気爆発に対する構造応答を解析的に求めるため、爆発源をAUTODYNのガスバグモデルを用いて模擬する。

ガスバグモデルは、任意の液体・気体物質に対して適用性のあるモデルであり、対象の物質が周囲の系に対してする仕事量（＝開放エネルギー量）を圧力  $P$  と体積変化量  $\Delta V$  の関係で定義するものである。

図 3.4-1 にガスバグモデルの概念図を示す。

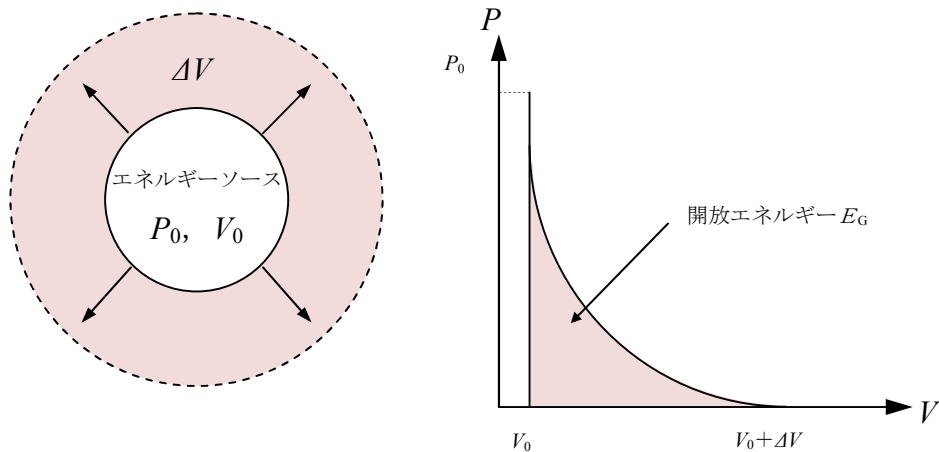


図 3.4-1 ガスバグモデルの概念図

図 3.4-1 に示すように、ガスバグモデルではエネルギーソースに対して圧力  $P$  と体積変化量  $\Delta V$  の関係で水蒸気爆発によって開放されるエネルギー総量を定義する。ガスバグモデルにおける開放エネルギーは、下式で与えられる。

$$E_G = \int_{V_0}^{V_0+\Delta V} P dV \quad (12)$$

ここで、爆発源の開放エネルギーは水蒸気爆発解析コード JASMIN E の結果（流体の運動エネルギー）に基づき設定している。

水蒸気爆発発生時には、トリガセルから周囲へ圧力波が伝播し、その発生エネルギーの大部分が流体の運動エネルギーに変換されると想定し、JASMIN E の解析結果から得られた全領域の流体の運動エネルギーの最大値を引き継いでガスバグモデルのインプット条件として設定している。図 3.4-2 に流体運動エネルギーの設定方法を示す。

なお、爆発源の設定位置は、JASMIN E 解析におけるトリガリングの発生位置と同様の位置とする。

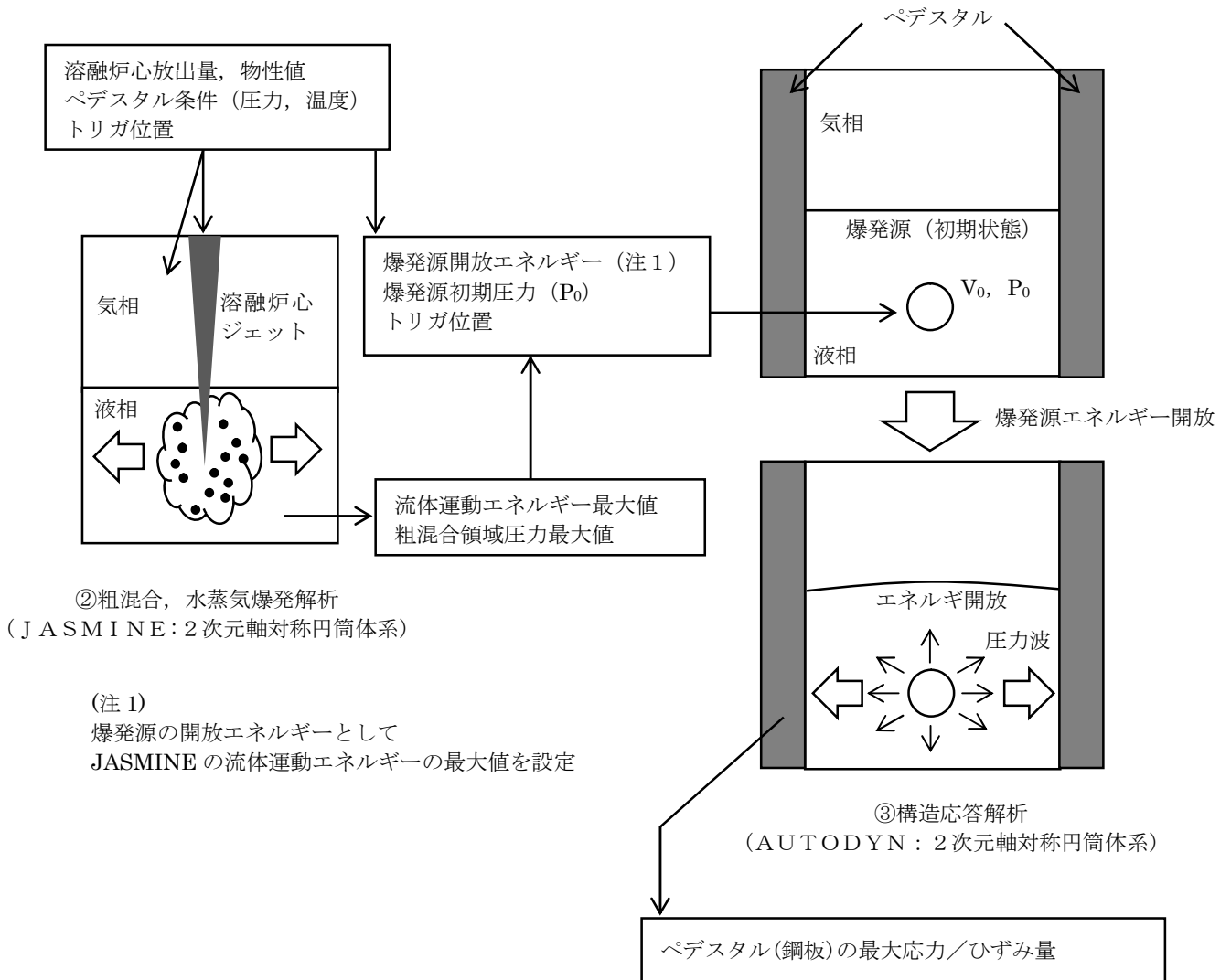


図 3.4-2 AUTODYNにおけるエネルギーの設定方法

### 3.5 解析フロー

AUTODYNの解析フローを図 3.5-1 に示す。

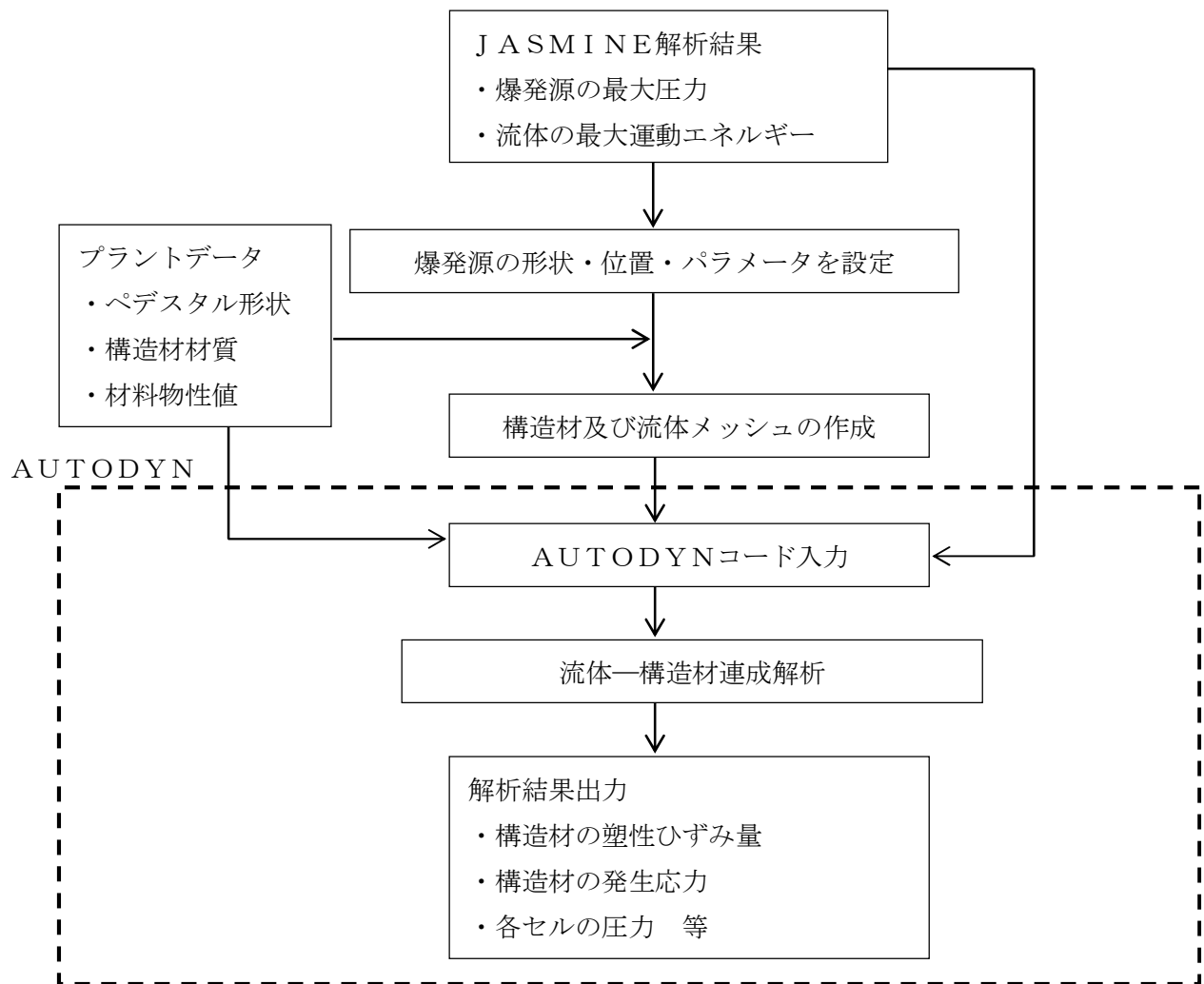


図 3.5-1 AUTODYNの解析フロー



### 3.6 入出力

AUTODYNコードの主要な入出力は図 3.5-1 に示した解析フロー図にも示されるとおりである。AUTODYNコードのインプットデータは以下のとおり構成される。

<入力>

- 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 材料の物性値
- 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 (Lagrange / Euler, 等)
- ⑥ 爆発源の形状・位置 (JASMIN Eコードの評価条件・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。

<出力>

- ① 材料分布図
- ② 塑性ひずみ
- ③ 構造材の発生応力

### 3.7 解析結果の例示

本項では、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

図 3.2-1 に示す解析モデルとする。要素分割の詳細を表 3.7-1 に示す。

表 3.7-1 要素分割の詳細

部位	要素タイプ	要素幅	要素数
コンクリート	Lagrange (Solid)		
内外鋼板	Shell		
空気, 水, エネルギーソース	Euler		

#### (2) 材料物性

代表プラントのペDESTALの構成材料を以下に示す。

コンクリート：普通コンクリート（設計基準強度：29.4N/mm<sup>2</sup>）

鋼板：SPV490

材料物性の詳細を表 3.7-2 及び図 3.7-1 に示す。

表 3.7-2 材料特性一覧

材料	密度※1	体積 弾性率※2	横弾性率 ※2	降伏応力 ※1	最大引張 強さ※1	限界ひずみ ※1
コンクリート				(図 3.7-1 の関係式による)		
SPV490						

※1 ノミナル物性値である。

※2 ノミナル物性値であり、下式に基づき算出したもの

$$\text{体積弾性率 } K = E / (3 \times (1 - 2 \cdot \nu))$$

$$\text{横弾性率 } G = E / (2 \cdot (1 + \nu))$$

ここで、

Eは縦弾性係数で

$\nu$ はポアソン比で

--

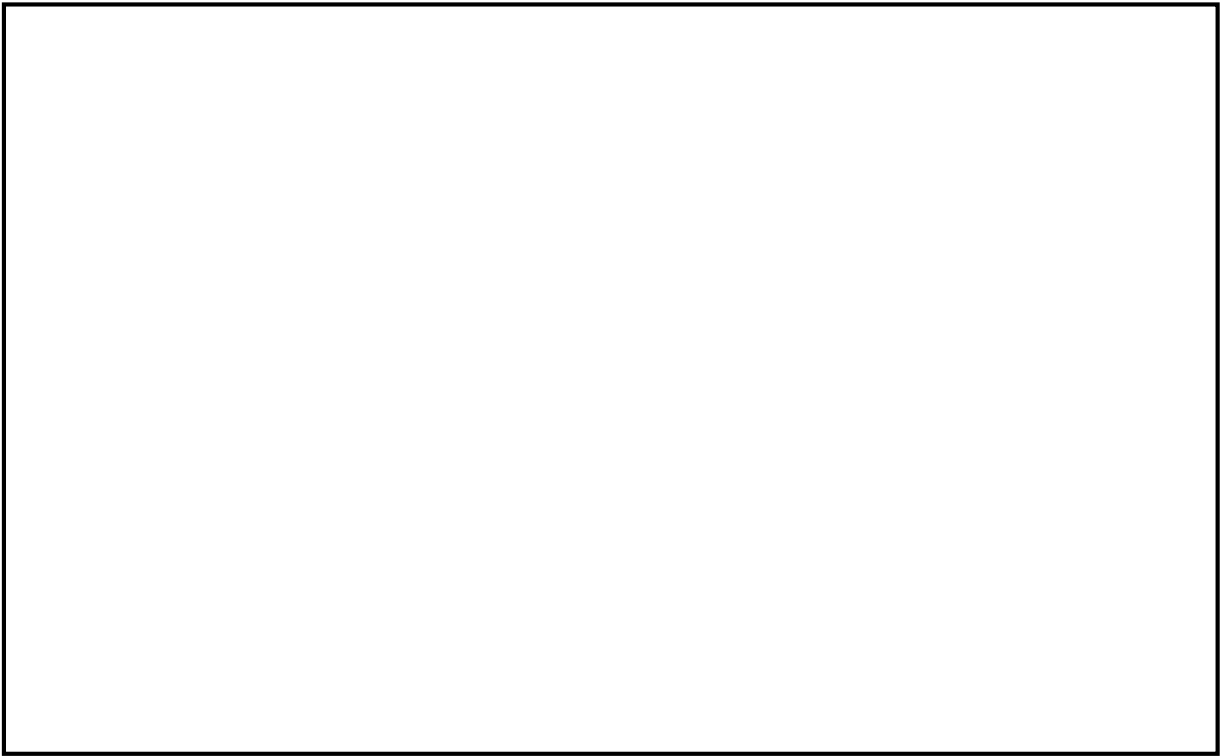


図 3.7-1 Drucker-Prager 構成則に基づくコンクリートの圧力-降伏応力関係

(3) 爆発源の荷重仕様

ガスバグモデルの入力条件を表 3.7-3 に示す。

また、体積変化と圧力の関係を図 3.7-2 に示す。

表 3.7-3 ガスバグモデルの入力条件

項目	値	備考
運動エネルギー		
初期半径		
初期圧力		
体積変化		

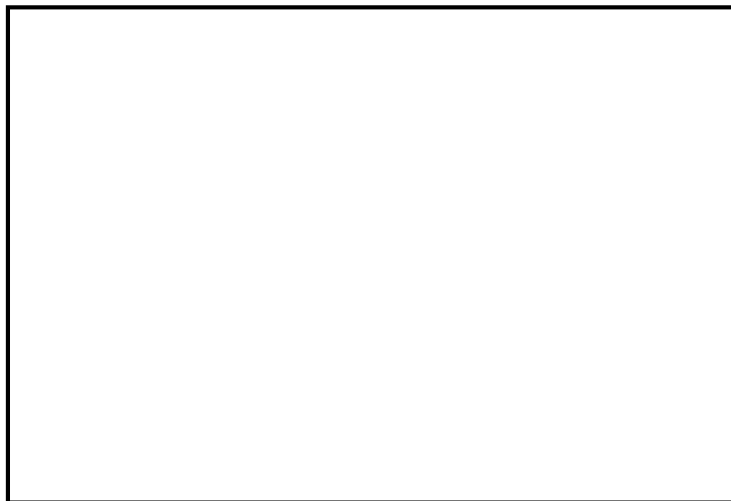


図 3.7-2 体積変化と圧力の関係

(4) 解析結果

(1)から(3)の入力条件に基づき解析を実施した結果を以下に示す。

ガスバグモデルの圧力の時刻歴を図 3.7-3 に，開放エネルギーの時刻歴を図 3.7-4 にそれぞれ示す。

下図に示す通り，圧力と体積変化による仕事量が所定の開放エネルギーに達する時刻は，約  であった。



図 3.7-3 ガスバグモデルの圧力の時刻歴

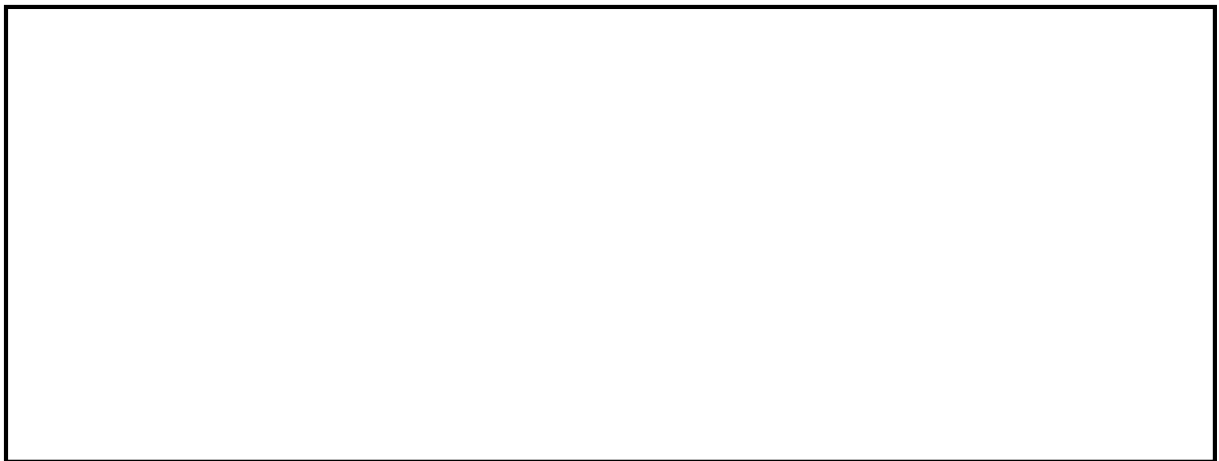


図 3.7-4 ガスバグモデルの開放エネルギーの時刻歴

次に，主要な時刻における材料分布図を図 3.7-5～図 3.7-8 に示す。

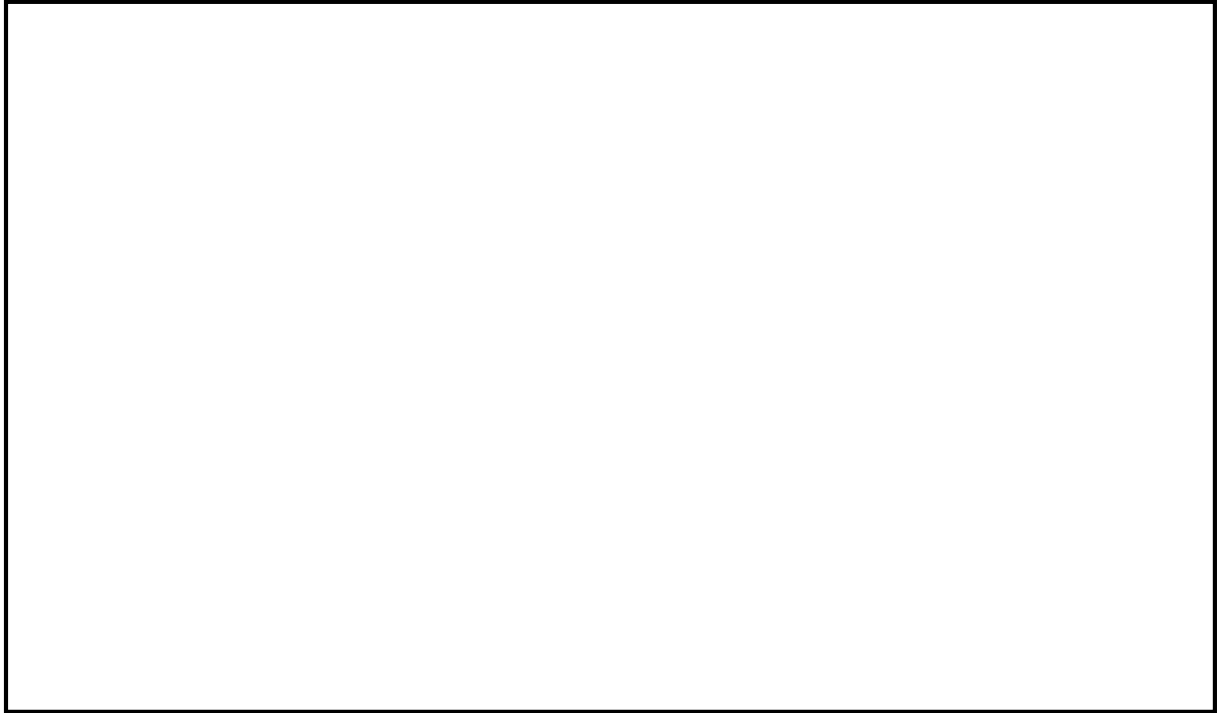


図 3.7-5 材料分布図 (5ms)

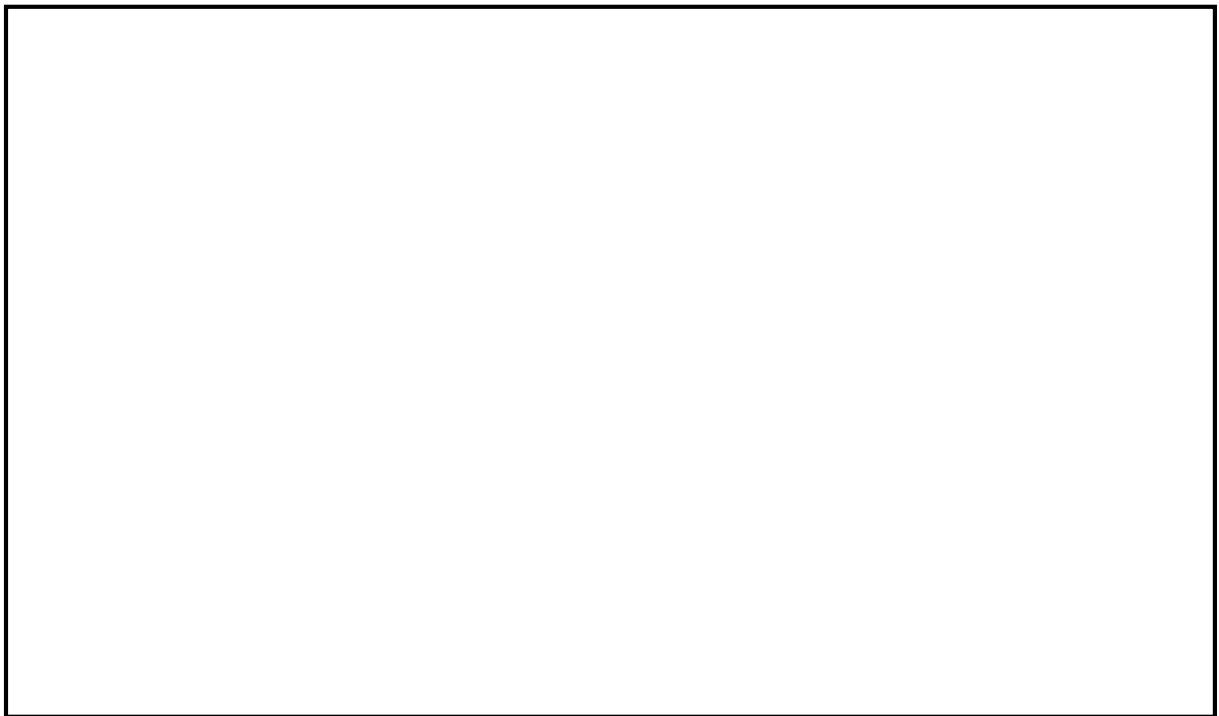


図 3.7-6 材料分布図 (10ms)



图 3.7-7 材料分布图 (15ms)

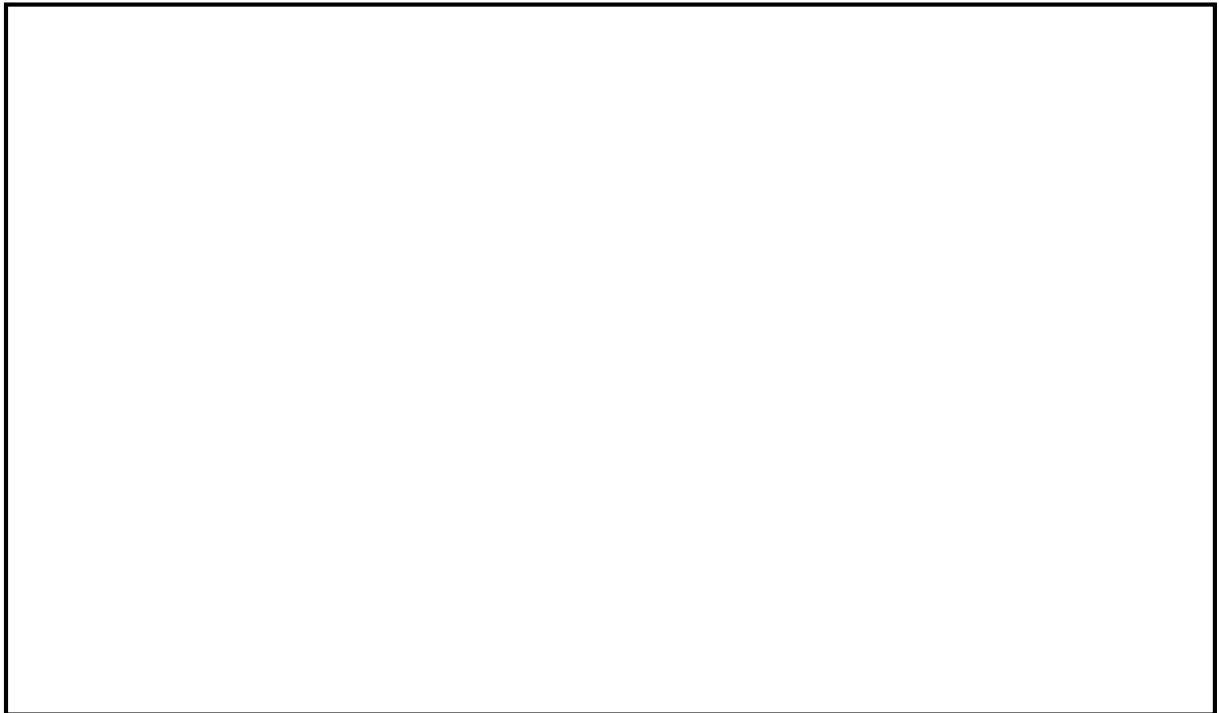


图 3.7-8 材料分布图 (20ms)

次に，爆発発生から 5ms 後の内外鋼板の塑性ひずみの分布を図 3.7-9 に示す。



図 3.7-9 爆発発生から 5ms 後の内外鋼板の塑性ひずみの分布  
(最大塑性ひずみ : 0.0%)



次に、強度部材である鋼板（内側及び外側）に発生する最大ミーゼス応力の時刻歴を  
 図 3. 7-10 及び図 3. 7-11 に示す。

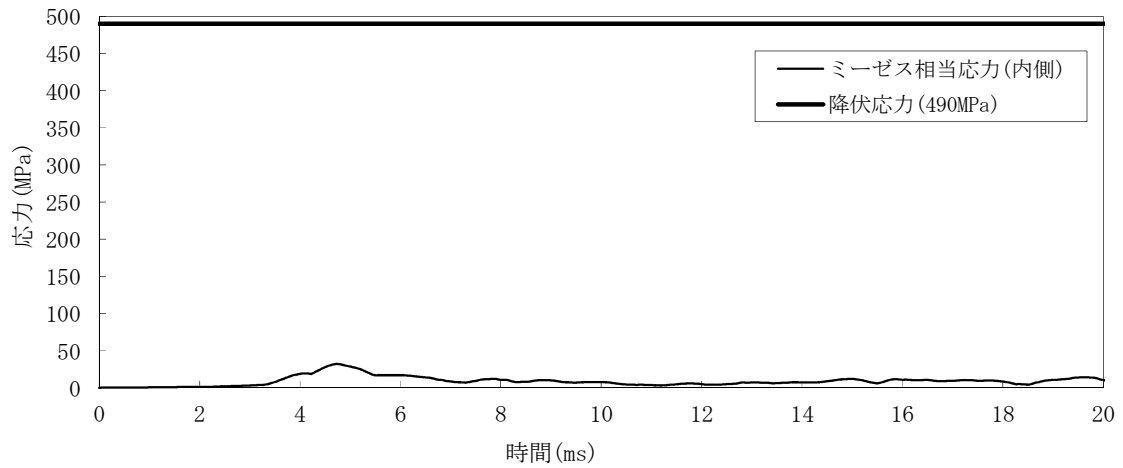


図 3. 7-10 内側鋼板の最大ミーゼス応力の時刻歴

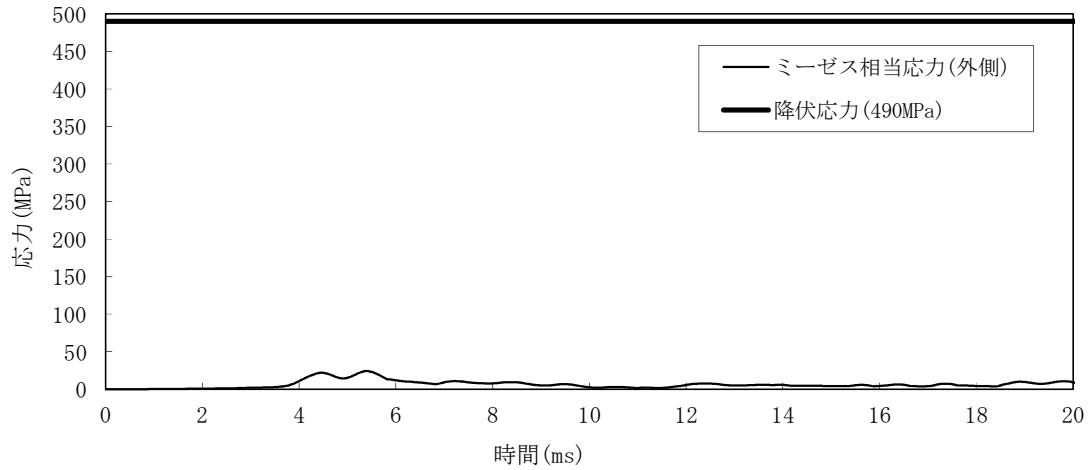


図 3. 7-11 外側鋼板の最大ミーゼス応力の時刻歴

#### 4. 解析結果の検証

本章では、AUTODYNを用いた解析解と理論解の比較検証結果を示す。

AUTODYNを用いたペDESTALの構造応答解析は、鋼板（または鉄筋）部を2次元軸対称 Shell 要素で、コンクリート部を2次元軸対称 Lagrange 要素でそれぞれモデル化して実施していることから、検証は Shell 要素及び Lagrange 要素の両方で実施する。

##### (1) 2次元軸対称 Shell 要素を用いた解析

図 4-1 に示すように単純な円筒形状の構造物を2次元軸対称 Shell 要素でモデル化し、内面に圧力衝撃荷重（台形波：図 4-2 参照）が作用した際の変位動的倍率（静的な解に対する倍率）を解析的に求め、理論解との比較評価を実施する。

なお、図 4-2 に示す圧力荷重履歴は、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。

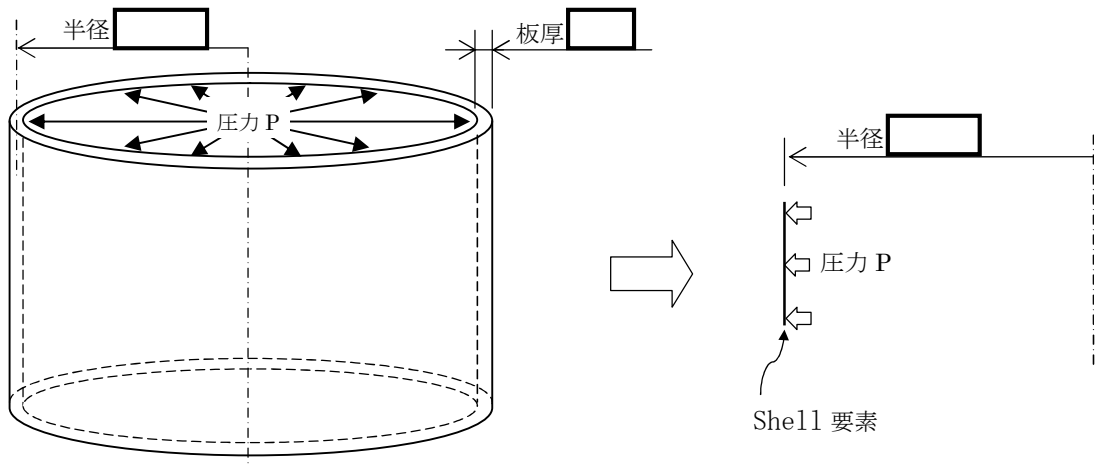


図 4-1 対象形状

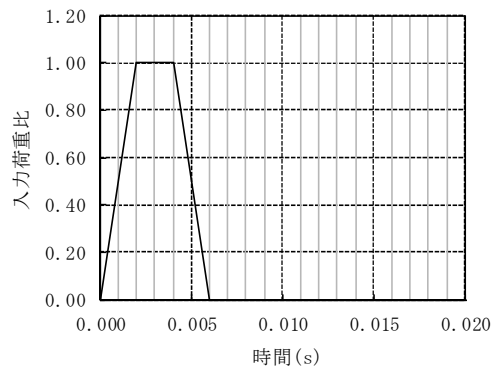


図 4-2 圧力衝撃荷重の荷重履歴

計算に用いる物性値を表 4-1 に示す。

表 4-1 計算に用いる物性値

項目	単位	値
ヤング率	MPa	
ポアソン比	—	
密度	kg/m <sup>3</sup>	
圧力	MPa	

上述の条件より，円筒構造物の台形荷重に対する応答を解析的に求め，理論解との比較を試みる。理論解は参考文献[1]及び参考文献[2]により求めた。以下に理論解の概要を示す。

(a) 円形リングの面内振動の固有振動数

参考文献[1]：機械工学便覧 α2 機械力学より

$$f = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ここで，

$R$ ：リング中央線の半径

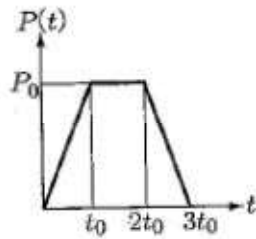
$E$ ：ヤング率

$\rho$ ：単位体積あたりの質量

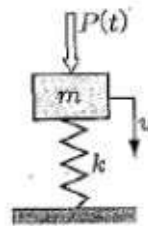
(b) 台形荷重に対する応答

参考文献[2]：基礎からの衝撃工学 森北出版 4.1.6 より

時間区分	動的倍率 (動的変位/静的変位)
i) $0 \leq t \leq t_0$	$L = \frac{u}{\delta_{st}} = \frac{t}{t_0} - \frac{\sin \omega t}{\omega t_0}$
ii) $t_0 \leq t \leq 2t_0$	$L = \frac{u}{\delta_{st}} = 1 + \frac{1}{\omega t_0} (\sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t)$
iii) $2t_0 \leq t \leq 3t_0$	$L = \frac{u}{\delta_{st}} = 3 - \frac{t}{t_0} + \frac{1}{\omega t_0} (\sin \omega (t - 2t_0) + \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t)$
iv) $3t_0 \leq t$	$L = \frac{u}{\delta_{st}} = \frac{1}{\omega t_0} (\sin \omega (t - t_0) - \sin \omega (t - 3t_0) + \sin \omega (t - 2t_0) - \sin \omega t)$



台形荷重



一質点モデル

ここで,

$$\omega = 2\pi f$$

$f$  : (a) で求めた円形リングの固有振動数

(b)による理論解と解析結果の変位動的倍率を比較した結果を図 4-3 に示す。

理論解による最大変位動的倍率 1.833 に対し、解析による変位動的倍率は 1.836 であり、理論解と解析結果は良い一致を示している。

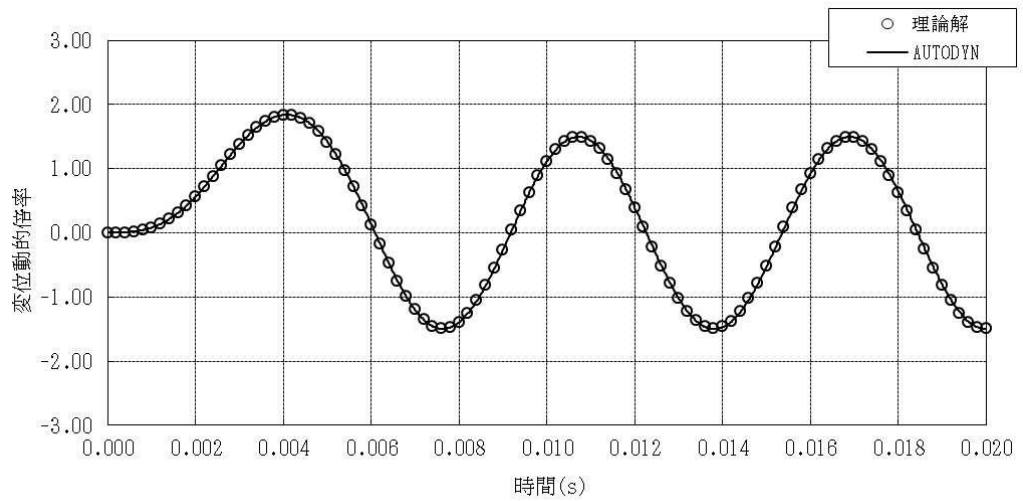


図 4-3 理論解とAUTODYNによる解析結果の比較  
(2次元軸対称 Shell を用いた解析)

(2) 2次元軸対称 Lagrange 要素を用いた解析

図 4-4 に示すように単純な円筒形状の構造物を 2次元軸対称 Lagrange 要素でモデル化し、内面に圧力衝撃荷重（台形波：図 4-5 参照）が作用した際の変位動的倍率（静的な解に対する倍率）を解析的に求め、理論解との比較評価を実施する。

なお、図 4-5 に示す圧力荷重履歴は、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。

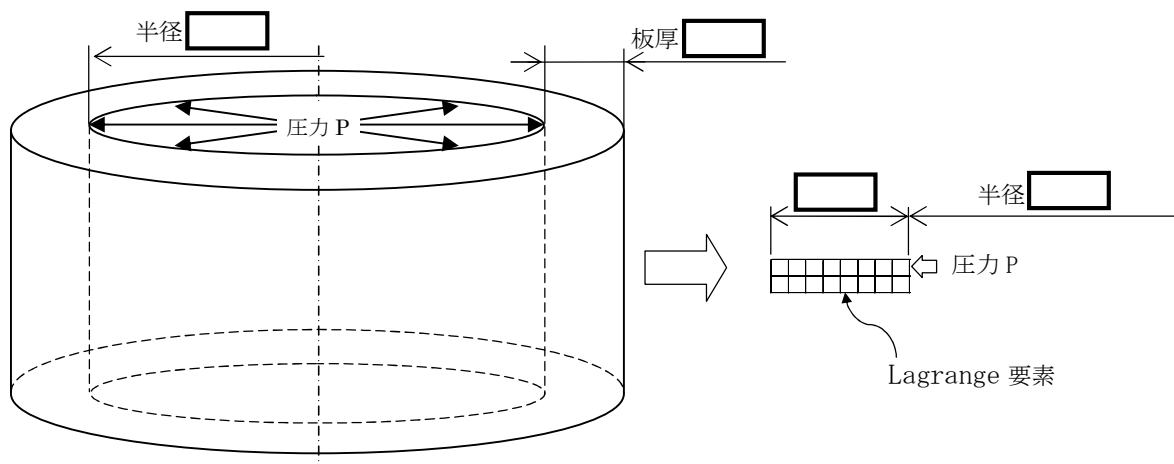


図 4-4 対象形状

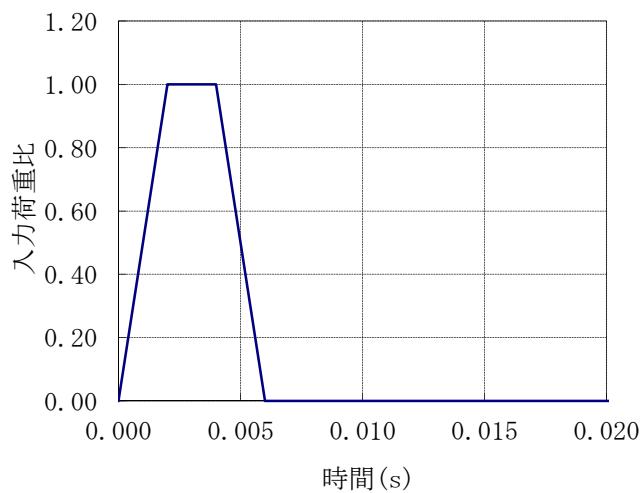


図 4-5 圧力衝撃荷重の荷重履歴

計算に用いる物性値を表 4-2 に示す。

表 4-2 計算に用いる物性値

項目	単位	値
ヤング率	MPa	
ポアソン比	—	
密度	kg/m <sup>3</sup>	
圧力	MPa	

上述の条件より，円筒構造物の台形荷重に対する応答を解析的に求め，理論解との比較を試みる。理論解は参考文献[1]及び参考文献[2]により求めた。以下に理論解の概要を示す。

(a) 円形リングの面内振動の固有振動数

参考文献[1]：機械工学便覧 α2 機械力学より

$$f = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ここで，

$R$ ：リング中央線の半径

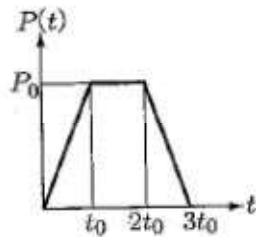
$E$ ：ヤング率

$\rho$ ：単位体積あたりの質量

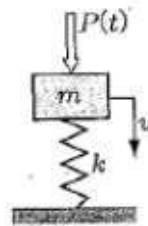
(b) 台形荷重に対する応答

参考文献[2]：基礎からの衝撃工学 森北出版 4.1.6 より

時間区分	動的倍率 (動的変位/静的変位)
i) $0 \leq t \leq t_0$	$L = \frac{u}{\delta_{st}} = \frac{t}{t_0} - \frac{\sin \omega t}{\omega t_0}$
ii) $t_0 \leq t \leq 2t_0$	$L = \frac{u}{\delta_{st}} = 1 + \frac{1}{\omega t_0} (\sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t)$
iii) $2t_0 \leq t \leq 3t_0$	$L = \frac{u}{\delta_{st}} = 3 - \frac{t}{t_0} + \frac{1}{\omega t_0} (\sin \omega (t - 2t_0) + \sin \omega (t - t_0) - \sin \omega t)$
iv) $3t_0 \leq t$	$L = \frac{u}{\delta_{st}} = \frac{1}{\omega t_0} (\sin \omega (t - t_0) - \sin \omega (t - 3t_0) + \sin \omega (t - 2t_0) - \sin \omega t)$



台形荷重



一質点モデル

ここで,

$$\omega = 2\pi f$$

$f$  : (a) で求めた円形リングの固有振動数



(b)による理論解と解析結果の変位動的倍率を比較した結果を図 4-6 に示す。

理論解による最大変位動的倍率 1.863 に対し、解析による変位動的倍率は板厚内面位置で 1.840、中央位置で 1.875、及び外面位置で 1.884 であり、理論解と解析結果は良い一致を示している。

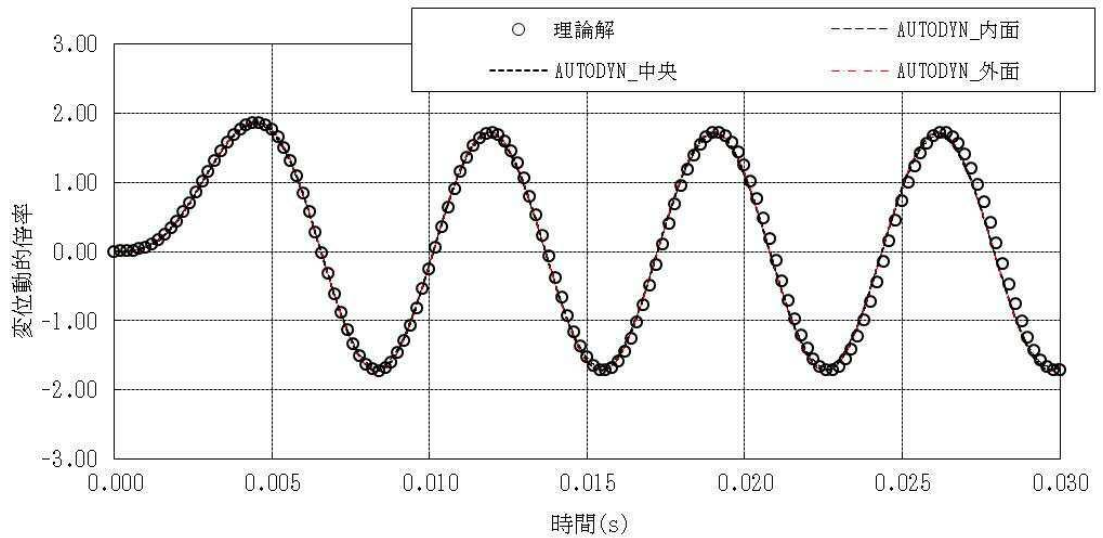


図 4-6 理論解とAUTODYNによる解析結果の比較  
(2次元軸対称 Lagrange を用いた解析)

### (3) 要素サイズの妥当性検証解析

設定した要素サイズの妥当性を確認するために、(2)で用いた2次元軸対称 Lagrange 要素のモデルを対象とし、要素サイズ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 4-7 に検討した円筒モデルの概要、図 4-8 及び図 4-9 に解析結果の比較を示す。

図 4-8 及び図 4-9 に示すように、F C I 解析に適用している要素サイズ (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-1%程度、周方向応力の解析結果の数値誤差は内面で-1%程度、外面で-1%程度であり、解析結果に対して影響を与えるような大きな差は無く、F C I 解析に使用する解析モデルの要素分割は妥当である。

\*) 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。

検討した円筒の概略寸法

内径：

壁厚：

高さ：

検討した円筒の物性

ヤング率：

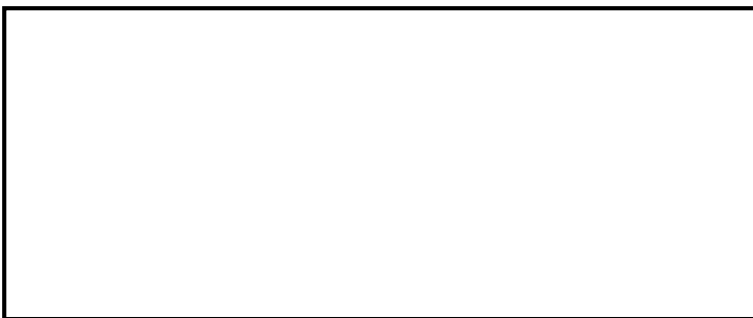
密度：

ポアソン比：

(モデル1)： F C I 解析と同等の要素サイズ



(モデル2)： F C I 解析の約 1/2 の要素サイズ



荷重条件

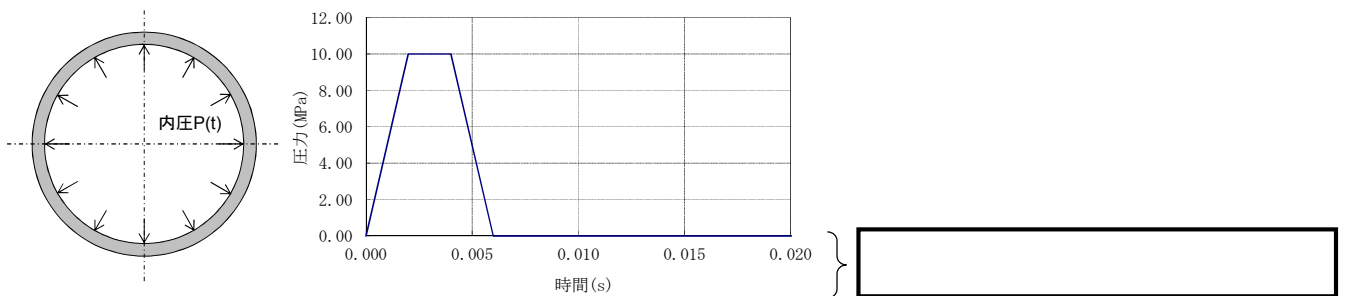
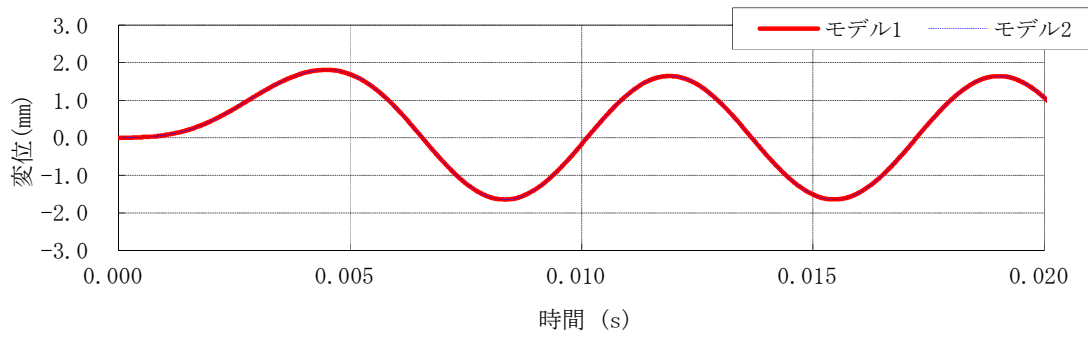
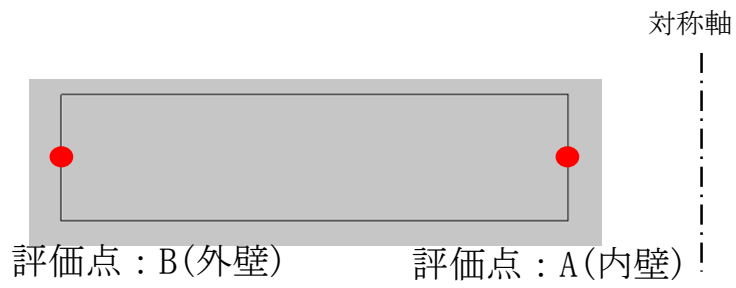
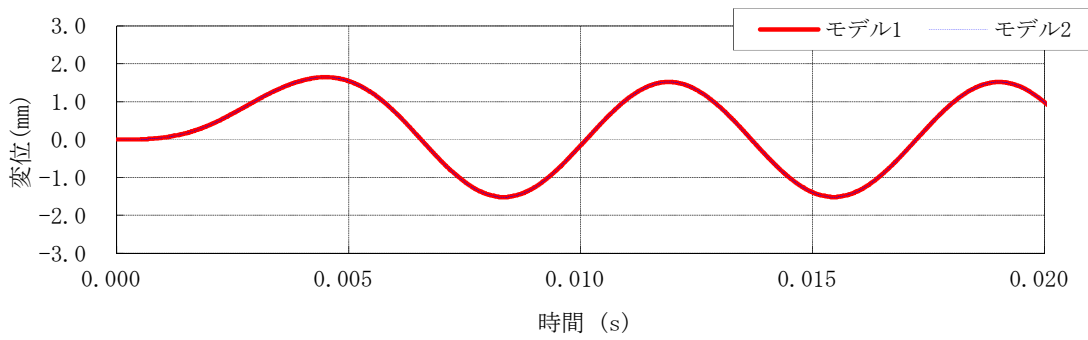


図 4-7 要素サイズの比較検討に用いた 2 次元軸対称円筒体系モデルの概要

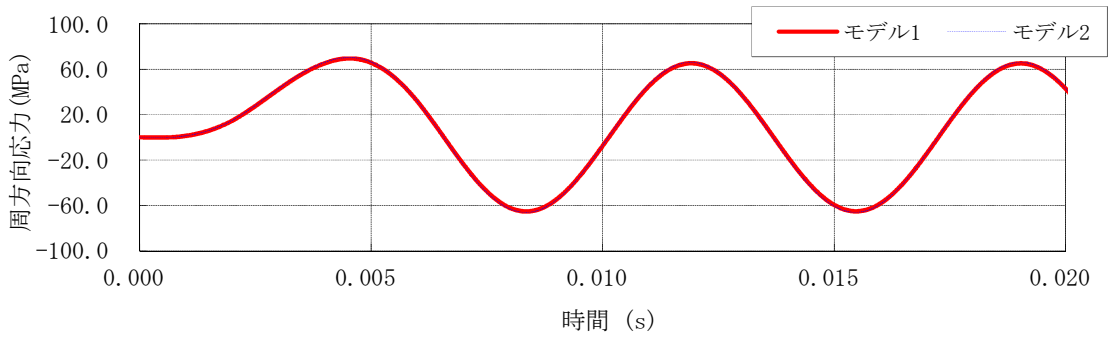
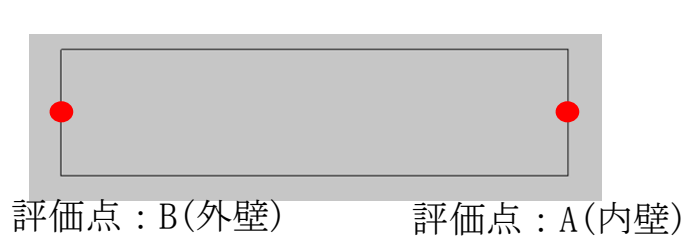


評価点：A (内壁)

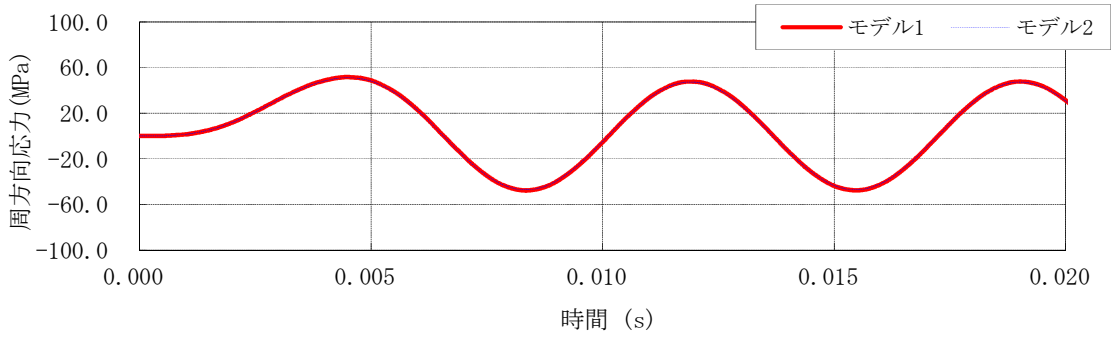


評価点：B (外壁)

図 4-8 要素サイズの異なるモデルの動的解析結果の比較 (径方向変位)



評価点：A (内壁)



評価点：B (外壁)

図 4-9 要素サイズの異なるモデルの動的解析結果の比較 (周方向応力)

5. 参考文献

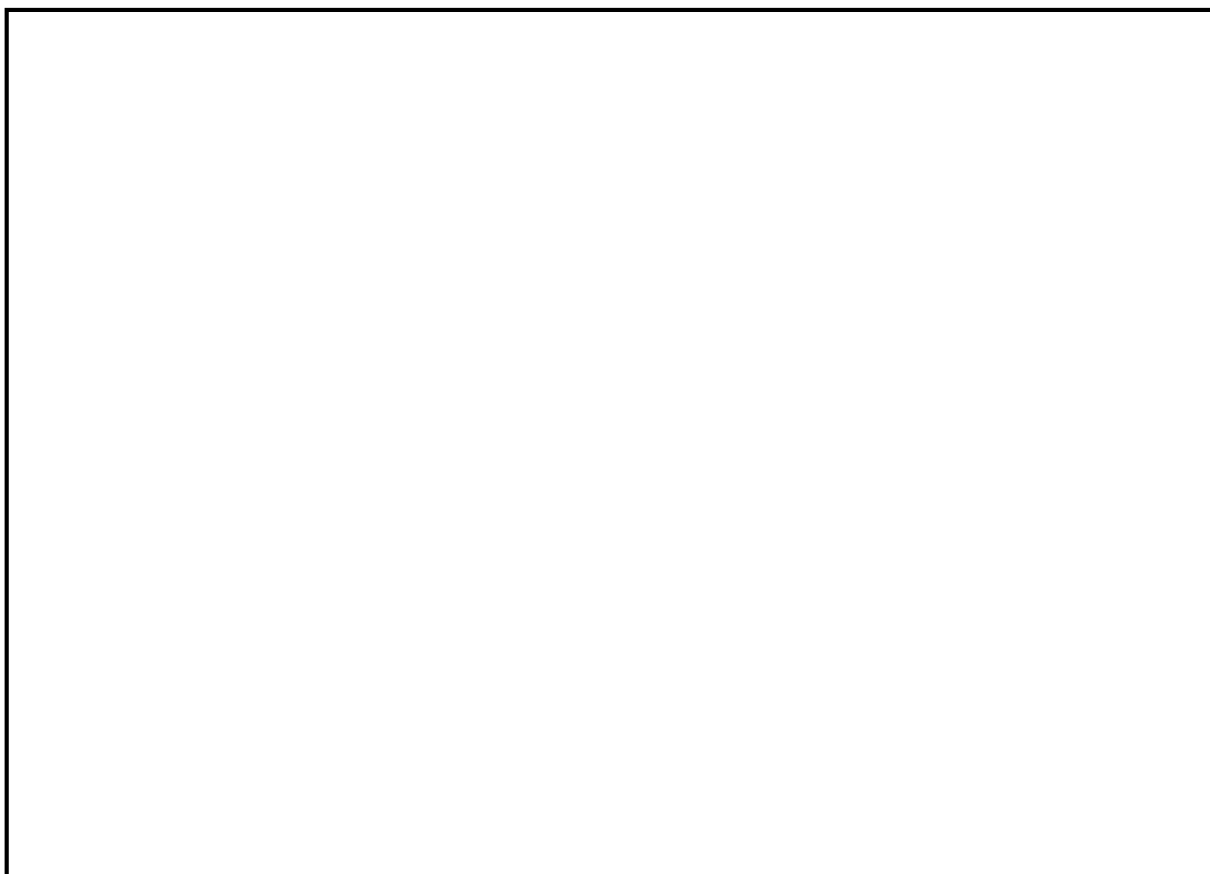
- [1] 機械工学便覧 基礎編  $\alpha 2$  機械力学（日本機械学会編）
- [2] 基礎からの衝撃工学－構造物の衝撃設計の基礎－（森北出版株式会社）

#### 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、AUTODYNの構造応答評価は、JASMIN解析結果により求まる水蒸気爆発時の流体の最大運動エネルギーに基づき実施している。すなわち、AUTODYN評価での爆発源の開放エネルギーをJASMIN評価における全領域の流体運動エネルギーと同等となるように設定している。

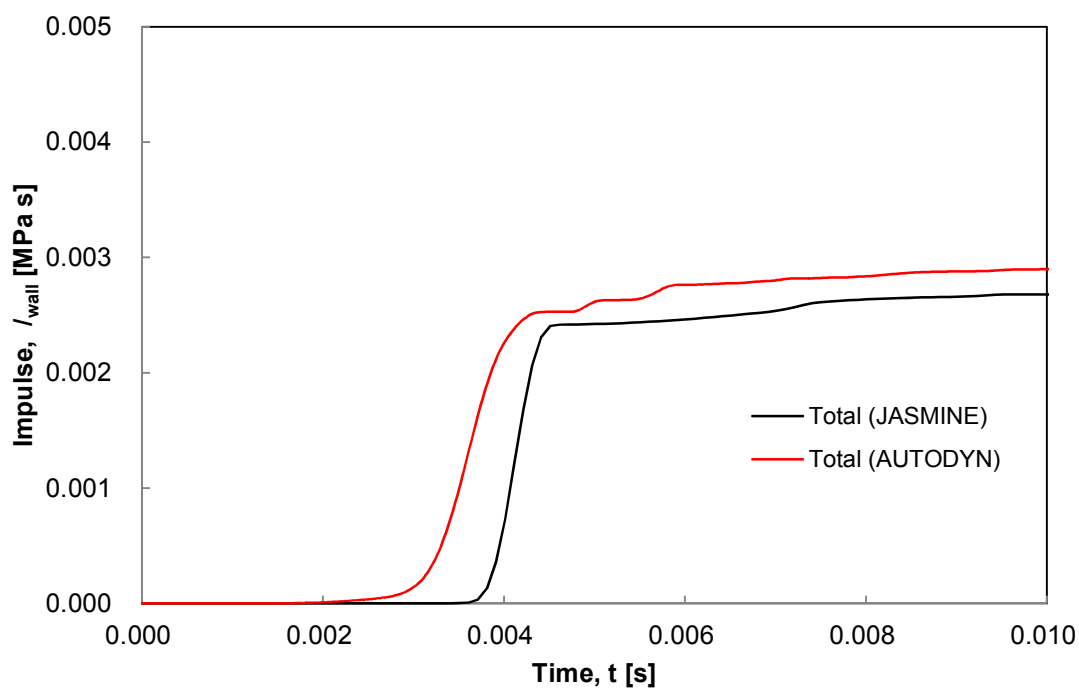
これは、水蒸気爆発発生時には溶融デブリからの熱エネルギーが爆発による圧力波を介して流体側に運動エネルギーとして伝わり、これが構造材のペDESTAL壁に作用するためであり、この運動エネルギーの最大値を解析条件としてAUTODYN評価に引き渡すことにより、ペDESTALの構造健全性を適切に評価できると考えられるためである。

上記の考え方の妥当性を確認するために、JASMIN解析とAUTODYN解析における代表点の圧力履歴を比較した。下図に示すとおり、AUTODYN解析における代表点の圧力履歴はJASMIN解析とほぼ同等であることから、AUTODYN解析条件の設定手法が妥当であることが確認できる。



添付図 1-1 AUTODYN解析とJASMIN解析の壁面圧力の比較

また、J A S M I N Eコードの解析による水蒸気爆発時の壁面力積履歴とA U T O D Y Nコードの解析による壁面力積履歴を比較した。添付図 1-2 に示す通り、J A S M I N EコードとA U T O D Y Nコードの解析結果から得られる壁面の力積はほぼ同等である。このことから、A U T O D Y N解析条件の設定手法が妥当であると考えられる。



添付図 1-2 A U T O D Y N解析と J A S M I N E解析の壁面の力積比較



## 添付2 反射波の考慮について

AUTODYNは非線形時刻歴応答解析の専用ツールであり、陰解法ソルバ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ソルバ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F C I時のRPVペDESTALの構造応答は、構造体を模擬するLagrange要素 [ ] ( [ ] のSolid要素と幅 [ ] のShell要素)と流体を模擬するEuler要素 [ ] 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。Lagrange要素 (Solid要素及びShell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設定したものである。一方、Euler要素は、Lagrange要素との力のやり取りの関係からLagrange要素よりも小さく設定することが推奨されており、要素幅を [ ] と設定している。

なお、一般的に陽解法ソルバでは、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。

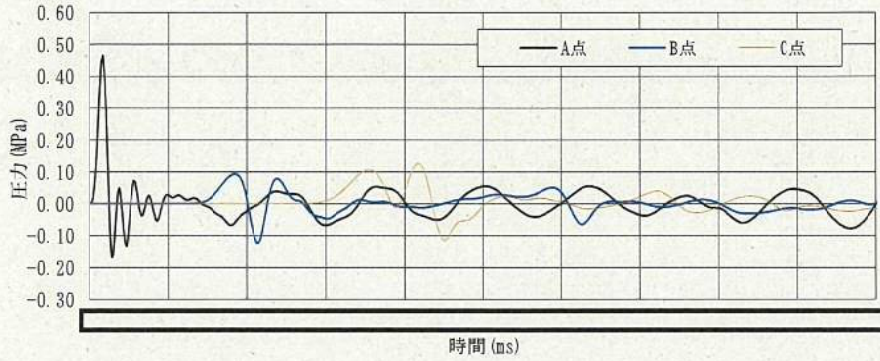
ここで、反射波の影響確認を目的として、単純なLagrange要素のモデルにパルス状の荷重を付加した場合の構造物内部の圧力履歴を調査した。解析体系と荷重条件を添付図2-1に示す。



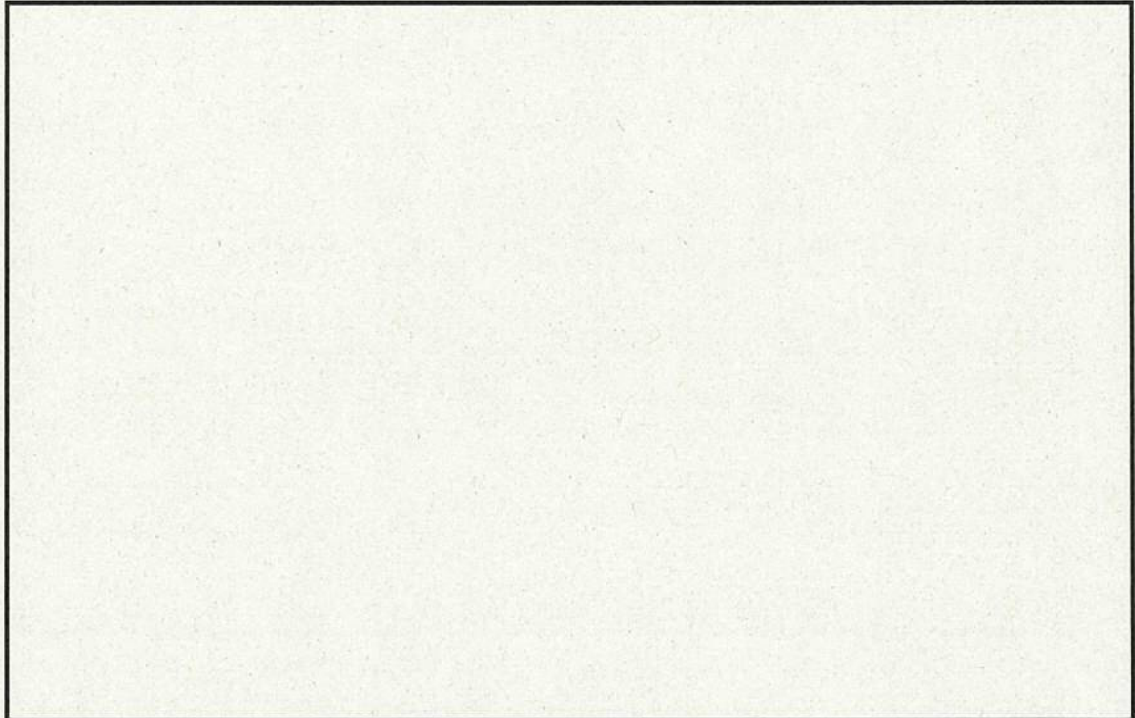
添付図 2-1 解析モデルと荷重条件

添付図 2-1 に示す条件で圧力伝播挙動を解析した結果として、代表点の Lagrange 要素の圧力時刻歴を抽出した結果を添付図 2-2 に、時刻毎の圧力分布を添付図 2-3 に示す。

添付図 2-2 に示す通り、圧力履歴は周期的に変動しており、圧力伝播と反射が繰り返される挙動が模擬されていることを確認した。



添付図 2-2 Lagrange 要素の代表点における圧力履歴



添付図 2-3 圧力分布の推移

また、同様のモデルを用いて、反射波の重畳の効果についても確認した。  
解析モデルと荷重条件を添付図 2-4 に示す。



添付図 2-4 解析モデルと荷重条件

添付図 2-4 に示す条件で圧力伝播挙動を解析した結果として、圧力測定点の Lagrange 要素の圧力時刻歴を抽出した結果の比較を添付図 2-5 に示す。

添付図 2-5 に示す通り、ケース 1 とケース 2 の入力を重ね合わせたケース 3 の解析結果は、ケース 1 とケース 2 の解析で得られた個々の圧力波形の重ね合わせとして表現されていることが確認された。これにより、AUTODYN コードでは圧力伝播と反射、及び反射波の重畳が適切に模擬されていることを確認した。

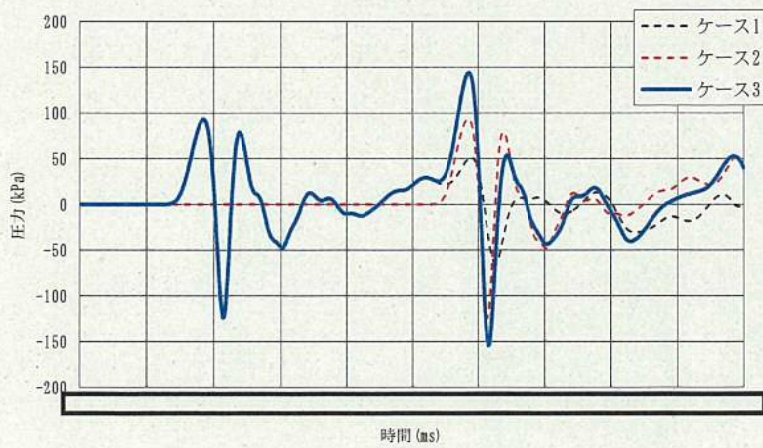
<ケース 1>



<ケース 2>



<ケース 3>

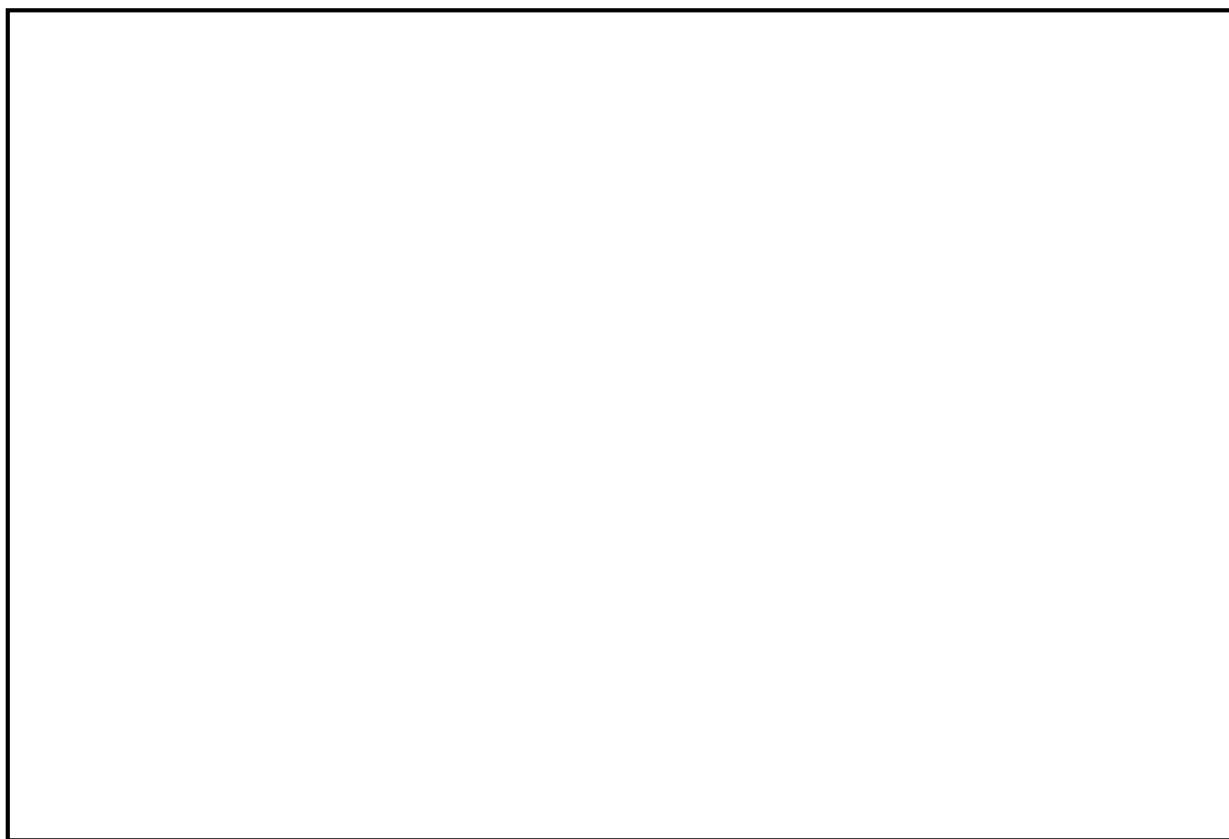


添付図 2-5 各ケースの圧力履歴

また、3章に示すペDESTALの構造解析において、水蒸気爆発によって没水部のペDESTAL外側壁面に負荷される圧力荷重の総和を添付図 2-6 に示す。

今回の解析対象である水蒸気爆発は、高い圧力の荷重がごくわずかな時間(ミリ秒単位)で作用する事象であり、この圧力による荷重の総和が没水部のペDESTALへ負荷される際に、伝播荷重による反射波が有意な影響を及ぼすか確認した。

添付図 2-6 より、爆発エネルギーの解放直後の発生荷重が支配的であり、その後は伝播荷重が減衰し、仮に反射波が重畳した場合でも解放直後の荷重を上回ることは無いものと考えられる。



添付図 2-6 圧力によってペDESTAL外側壁面に作用する荷重

### 添付3 ペDESTAL構造応答評価における判定基準について

本章では、ペDESTAL構造応答評価における判定基準の考え方について述べる。

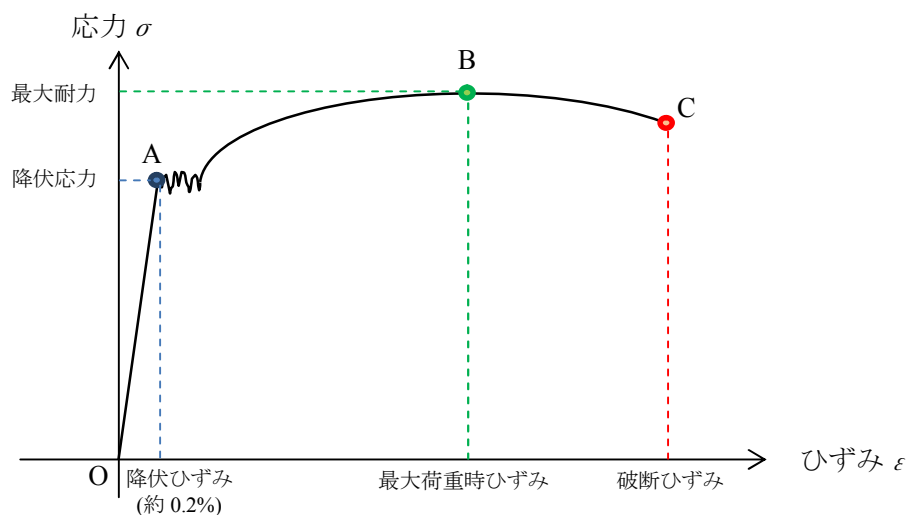
F C I時の荷重に対するペDESTALの機能喪失モードとして、強度部材の破損によるRPV支持機能の喪失が考えられる。本解析では、構築物としてのペDESTAL全体でのRPV支持機能の確認を目的とし、主たる強度部材としての鋼板の発生応力を保守的に見積もる観点から、内外鋼板の間に設置されている縦リブをモデル化せず、2次元軸対称体系での構造応答を評価する。したがって、主たる強度部材である鋼板がF C I時の荷重に対して破断せず、ペDESTAL全体として荷重負担能力を維持していることが機能維持評価の判定基準となる。

一般に鉄鋼材料の負荷荷重とひずみの関係は、添付図3-1の通りに表される。

原点Oから点Aまでの領域は、外力によってなされた仕事に変形によって弾性エネルギーとして材料内に蓄えられ、外力を除くと変形の回復とともにエネルギーが放出される領域である。すなわち、永久変形が生じない弾性範囲であり、点Aは「降伏点」、点Aの応力は「降伏応力」と呼ばれている。

外力により材料に生じる応力が降伏応力を超える場合、材料には塑性変形が生じるものの、ひずみ硬化によって外力の増加に応じて応力はなだらかに上昇する。その後、さらに外力を増加させると、応力の最大点（点B）を経て、徐々にひずみが進展し、最終的にはあるひずみ量となった時点で破断する。（点C）

ここで、点Bを「最大荷重点」、点Bの応力を「最大耐力」、点Bのひずみを「最大荷重点時ひずみ」と称する。また、点Cを「破断点」、点Cのひずみを「破断ひずみ」と称する。



添付図3-1 鉄鋼材料の応力-ひずみ線図の例

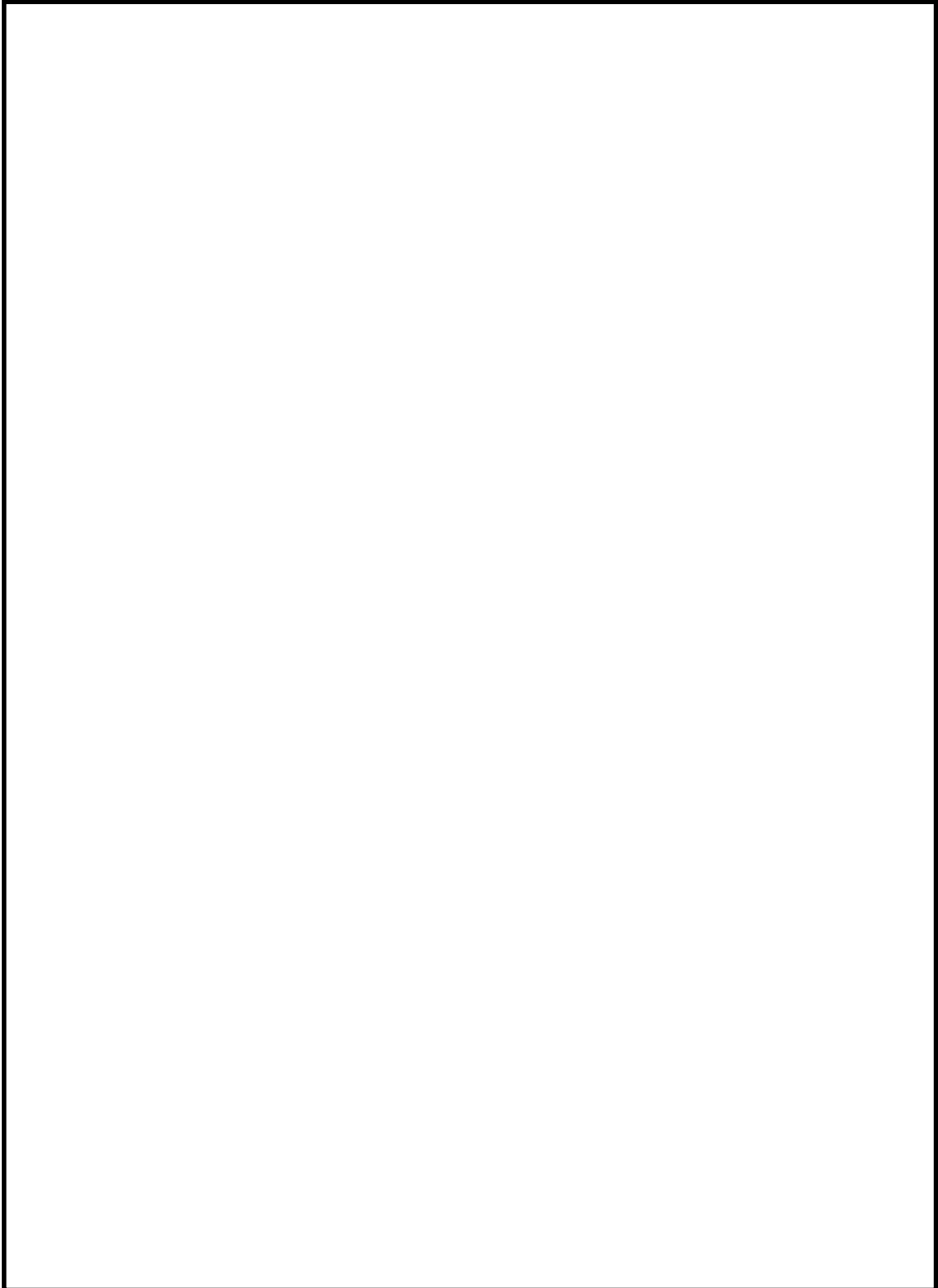
ペDESTALの機能維持の観点からは、耐力が低下せず、外力の増加に対応できる範囲

であれば荷重負担能力が維持できることから、F C I 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一つの判断基準であると考えることが出来る。

ここで、代表プラントにおけるペデスタル鋼板の材質である SPV490 の材料試験データの例を既往知見<sup>[1]</sup>から引用し、添付図 3-2 に示す。

添付図 3-2 によれば、SPV490 の最大荷重時ひずみは 10%程度であり、代表プラントの解析結果(降伏応力未満)は、ひずみ量の判断基準と比較しても十分に余裕のある結果であることが分かる。

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



添付図 3-2 参考文献[1]抜粋