

# 機 器 応 力 評 価 コ ー ド の 整 備

平 成 2 3 年 9 月

独 立 行 政 法 人 原 子 力 安 全 基 盤 機 構

本報告書は、独立行政法人 原子力安全基盤機構が実施した  
業務の成果をとりまとめたものです。  
本報告書の複製、転載、引用等には、当機構の承認が必要です。

## 機器応力評価コードの整備

### 要 旨

安全審査のクロスチェック解析及びトラブル解析に機器応力評価コードSERENAは用いられており、本報告書はH20年度とH22年度に実施したSERENAコードの整備をとりまとめたものである。

Windowsシステムでの開発環境を維持するために、SERENAコードを構成しているプログラム言語をマイクロソフトVB6からマイクロソフトVB2008へと更新した。

また、H19年度に整理した応力分類及び応力評価に係る主要な課題点は、以下の4点である。

- ・長名なファイル指定時の確認が困難である
- ・3次元解析モデルの応力分類の計算時間が長時間を要する
- ・計算プロセスが非表示のために入力データエラーの特定が困難である
- ・応力評価線の自動設定機能及び評価対象領域での代表線抽出機能が無いため非効率的である

これらを解決するためにGUIとプログラムの再設計等による機能改良及び機能追加を本コードに行い、応力分類及び応力評価における効率性と利便性を向上させた。

一方、「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1987」から「電気技術規程JEAC4601-2008」に新しく定められた原子力発電施設等の設備での機器・配管系に関する主要な規程は、以下の3点である。

- ・耐震重要度Sクラスの各施設は基準地震動 $S_s$ の地震力に対しても安全機能が保持出来ること
- ・耐震強度評価に鉛直方向地震力を考慮すること
- ・荷重の組合せにSRSS法を導入していること

SERENAコードはJEAG4601-1987に基づいた原子力発電施設等の設備での5種類の代表的な容器に関する耐震強度評価方法を整備しているが、JEAC4601-2008の新しい規定に基づいた耐震強度評価方法は整備していないために平成22年度の作業で、5種類の代表的な容器のうち、最初にスカート支持たて置円筒形容器に係るJEAC4601-2008に基づく耐震強度評価方法を本コードに機能追加し、適正に耐震強度評価が行えることを確認した。

# 機器応力評価コードの整備

## 目 次

1. 序論 .....	1-1
2. プログラム言語の更新 .....	2-1
3. 応力分類機能及び応力評価機能の整備 .....	3-1
3.1 応力分類機能の整備 .....	3-1
3.2 応力評価機能の整備 .....	3-2
4. スカート支持たて置円筒形容器の耐震強度評価方法の追加 .....	4-1
5. 応力分類機能の検証 .....	5-1
5.1 検証モデル .....	5-1
5.2 2次元軸対称解析モデルでの検証 .....	5-1
5.2.1 応力評価線の自動設定と代表抽出 .....	5-1
5.2.2 2次元軸対称解析モデルでの計算精度の検討 .....	5-2
6. 結論 .....	6-1
参考文献 .....	参-1

## 表一覧

表 1.1	機器応力評価コード SERENA の階層構造 .....	1-3
表 4.1	本耐震強度評価方法の評価順序と評価項目 .....	4-3
表 5.1	検証解析モデルの応力分類制御データ .....	5-5
表 5.2	応力分類での中間ファイル .....	5-6
表 5.3	応力評価線の代表抽出 .....	5-7
表 5.4	検証解析モデルの計算値と理論解の比較 .....	5-10

## 図一覧

図 1.1 機器応力評価コード SERENA のメインメニュー.....	1-4
図 3.1 応力分類機能でのファイルダイアログボックスの表示欄の拡張 .....	3-4
図 3.2 プロセスモニター関連の画面 .....	3-5
図 3.3 応力評価線のデータ作成方法 .....	3-6
図 3.4 応力評価機能でのファイルダイアログボックスの表示欄の拡張 .....	3-7
図 4.1 本耐震強度評価方法の計算条件.....	4-4
図 4.2 本耐震強度評価方法プログラムのサブルーチン等の相関関係と計算フロー .....	4-5
図 4.3 本耐震強度評価方法の入力画面.....	4-6
図 4.4 本耐震強度評価方法の入力データ構造 .....	4-7
図 5.1 検証解析モデル .....	5-11
図 5.2 検証解析モデルの応力評価線 3 近傍の節点 .....	5-12

## 1. 序論

原子力安全基盤機構（以下、「機構」という。）での原子力発電設備の機器の構造健全性に係る応力解析と応力評価においては、工事計画認可申請書（以下、「工認申請書」という。）等の資料を基に民間規格である(社)日本機械学会の「発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2005)」(以下、「JSME 設計・建設規格」という。)<sup>(1)</sup>及び(社)日本電気協会の電気技術指針 JEAG4601-1987「原子力発電所耐震設計技術指針」(以下、「JEAG」という。)<sup>(2)</sup>に従い、機構が所有する応力解析コード FELIOS (以下、「FELIOS」という。)や商用応力解析コード ABAQUS や ANSYS 及び機器応力評価コード SERENA (以下、「SERENA コード」という。)を用いて実施する。

平成 18 年度迄<sup>(2)~(8)</sup>に、JSME 設計・建設規格の改訂等を SERENA コードに反映するとともに、SERENA コードの耐震強度計算及び規格計算機能に係る整備を行った。また、応力評価が可能な解析コードの対象を FELIOS の他に、ABAQUS 及び ANSYS に拡張した。

平成 20 年度の整備は、平成 19 年度に機構が実施した ABWR プラントの RIP 貫通孔(N1 ノズル)についての工認申請書の計算によく用いられている手法である 2 次元軸対称解析モデルでの応力解析結果及び実機形状に基づいた 3 次元解析モデルでの応力解析結果について、SERENA を用いて応力分類及び応力評価を行った時に判明した問題点及び課題点を集約し、a) 入力データエラー時のエラー箇所の判定が困難、b) 長名の入力データファイル指定時の確認が困難の 2 点の課題点を機能改良項目及び機能追加項目として整理し、これらの課題を解決し、応力評価における効率性及び利便性を向上させた。

実施した主要な作業は、以下のものである。

- ① 応力分類プログラムでは、応力評価線の自動設定方法として、内面側節点グループと外面側節点グループを定義するのみで、評価対象領域における評定応力種類に基づいた代表応力評価線を選定できる機能を追加する。さらに、3 次元応力分類方法として、解析結果ファイルのデータ読み込みアルゴリズムを改良し、計算時間を大幅に短縮化する。
- ② 応力評価プログラムでは、ファイル指定ダイアログボックスの表示欄を拡張するとともに、計算のプロセスをモニターする機能を追加する。

平成 22 年度は、SERENA の開発環境の維持の観点から、SERENA コードのメインシステムに用いられている(株)マイクロソフト製 Visual Basic 6 が、2008 年 4 月に開発環境のサポー

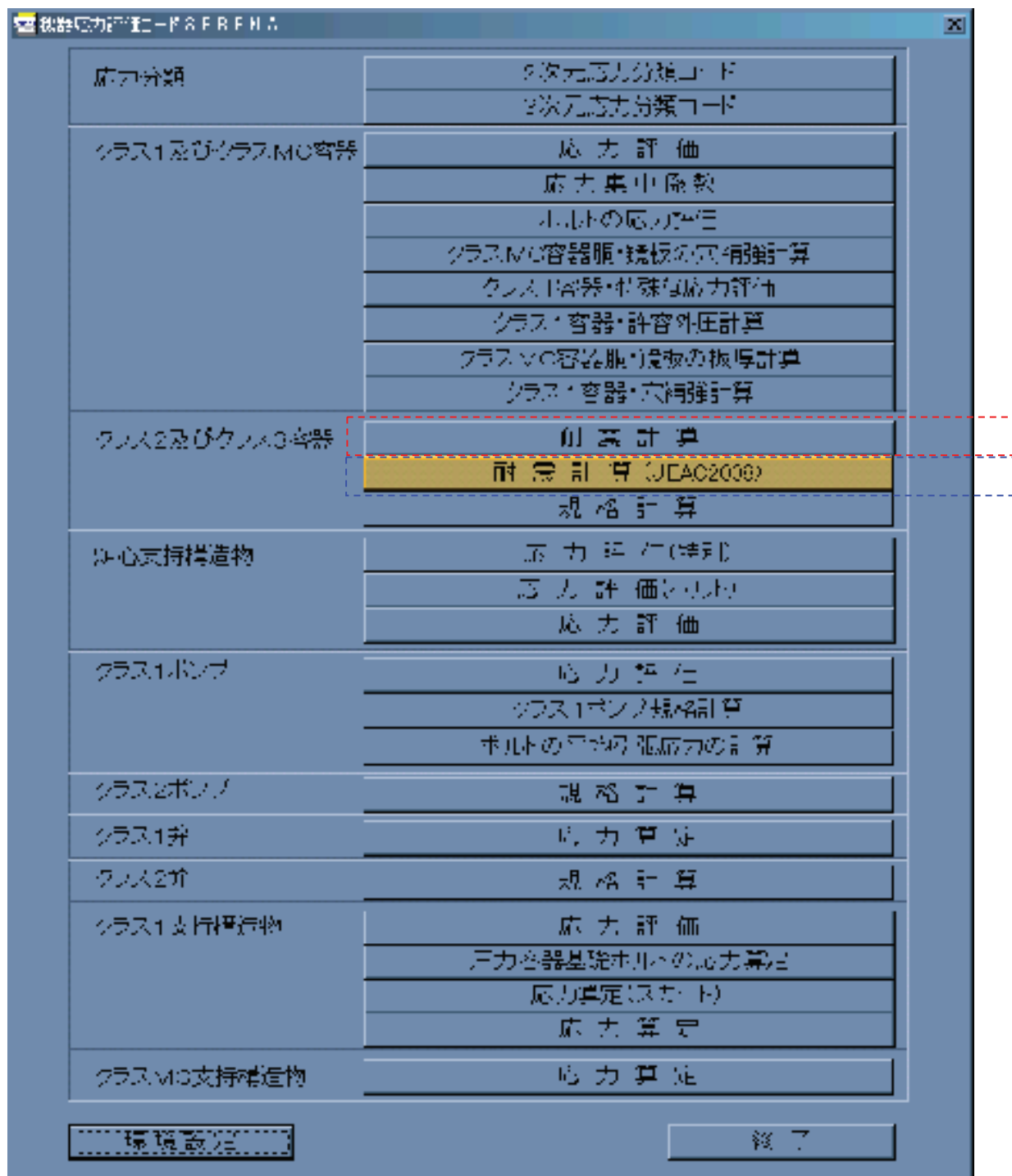
トが終了したため、比較的近年にリリースされた VB2008 等の開発言語に更新した。一方、SERENA コードの応力分類及び応力評価の問題点及び課題点 a) 入力データエラー時のエラー箇所の判定が困難、 b) 長名の入力データファイル指定時の確認が困難の 2 点の課題点を解決するために、SERENA コードに機能改良及び機能追加を行い、迅速化かつ効率化を図る。また、(社)日本電気協会の電気技術規程 JEAC4601-2008 (以下、「JEAC」という。)<sup>(9)</sup>の平成 21 年 12 月発行に伴い、平成 18 年に改訂された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」(以下、「耐震設計審査指針」という。)が考慮された原子力発電施設等の設備での代表的な容器のスカート支持たて置円筒形容器に係る JEAC に基づく耐震強度評価方法を SERENA コードに整備する。

実施した主要な作業は、以下のものである。

- ① 開発環境の維持のために SERENA コードの記述言語を VB6 から、VB2008 へ更新する。
- ② 応力分類機能に計算のプロセスモニターを機能追加する。応力評価機能に対し、入力ファイルダイアログの表示欄拡張を行う。
- ③ JEAC4601-2008 に基づくスカート支持たて置円筒形容器の耐震強度評価方法の機能追加を行う。

機器応力評価コード SERENA の全体の階層構造を表 1.1 に示す。赤字の箇所が H20 及び H22 年度に整備した機能等であり、青字が来年度以降に整備を予定している機能である。整備された機器応力評価コード SERENA のメインメニューを図 1.1 に示す。従来のメインメニューに対して、青枠で囲われたボタンの様に JAEC に基づく耐震強度計算方法が追加された。これにより、従来の JEAG と機能追加された JEAC の両方の評価方法に基づく耐震強度評価が可能となっている。





赤枠：従来の JEAG に基づく耐震強度評価  
 青枠：機能追加された JEAC に基づく耐震強度評価

図 1.1 機器应力評価コード SERENA のメインメニュー

## 2. プログラム言語の更新

機器応力評価コードの表 1.1 にある第 2 階層と第 3 階層に使用されているプログラム言語は、マイクロソフト(以下、MS という。)の Visual Basic6 SP6 (以下、MS-VB6 という。)であったが、MS によるサポートが 2008 年に終了したため、Visual Basic 2008 (以下、VB2008 という。)に更新した。MS-VB6 で作成されたプロジェクト(フォーム・コントロール・コード等から構成されている)は、VB2008 が提供するアップグレードウィザードを用いて、VB2008 用のプロジェクトに更新することができるが、全ての機能が完全に更新されるわけではなく、アップグレードウィザードが出力する更新報告書に基づき、正常動作する様にプログラムを完成させる必要があった。更新対象となるモジュールの個数は、標準モジュール 109 個及びフォームモジュール 13 個の合計 122 個であった。これに伴い、前年度迄は機器応力評価コードの開発は、MS-VB6、MS-VC++6、インテル VISUAL FORTRAN 11 及び(株) グレープシティ表計算コンポーネント SPREAD 7.0J の 4 つの開発ツール群により行ってきたが、今年度より機器応力評価コードの開発は、MS-VB2008、MS-VC++2008、インテル VISUAL FORTRAN 11 及び(株) グレープシティ表計算コンポーネント SPREAD 7.0J の 4 つの開発ツール群により行った。各機能の単体試験及び全体試験を行い、システムが適正に動作することを確認した。



### 3. 応力分類機能及び応力評価機能の整備

#### 3.1 応力分類機能の整備

応力解析結果が格納された応力データファイル(形状データも含む)と応力分類方法を記述した制御ファイルにより、応力評価線での応力分類を行う機能に4項目の機能改良及び機能追加を施した。

##### (1) 表示欄の拡張

応力分類を実施する際の入力ファイルと出力ファイルを指定するファイルダイアログボックスを拡張し、トータルで255文字迄のファイル名に対応させた。図3.1に旧来のウィンドウと機能改良したウィンドウを示す。機能改良により、応力分類工程での視認性が向上した。

##### (2) プロセスモニターの機能追加

応力分類の計算が異常終了した時にその原因を分析する目的で、計算状況を表示するプロセスモニターを設けるとともに、アスキー形式のファイルに計算状況を記録する様に機能追加した。この機能は、Microsoft Visual C++ 2008にてWindowsプログラム化しており、図3.2にこのプロセスモニター関連の画面を示す。メインメニューの環境設定からモニターダイアログの設定が可能であり、1)プロセスモニターの表示のON/OFF、2)ログファイルへの出力のON/OFF、3)モニター対象実行モジュールのサブルーチンのログレベルの設定の3種類の制御が行える。ただし、プロセスモニターを表示させる設定で応力評価を実行すると、表示させない時の10倍程度の計算時間を要する。機能追加により、応力分類の作業での問題解決の時間が大幅に短縮された。

##### (3) 応力評価線の自動設定

原子力発電施設等の機器に係る各供用状態での応力評価は、応力評価対象領域での応力強さの中で最も高いものを抽出し、安全解析上の保守的な応力評価断面とすることが構造健全性評価では重要である。通常、この評価断面の決定には多数の評価線を設定した上での検討が必要であり、検討には膨大な時間を要する。この検討時間を短縮化するために応力評価線の定義に係るデータ作成と応力評価線の順位付けを自動化した。

1本の応力評価線のデータ作成の従来方法は、図3.3a)に示す様に、応力評価線を挟み込む様

に節点番号を調べ、節点番号分のデータ作成を行う。従来は、安全解析のために評価対象領域内での応力分布に基づく代表線の設定が可能な本数分のデータ作成と応力分類を行っていた。

これらの一連の作業の省力化するために、図 3.3b)に示す様に、内面側節点グループと外面側節点グループを入力ファイルに定義して、総当たりで応力評価線データを作成し応力分類出来る様に設計し、応力評価対象領域で分類された応力強さ毎に、上位 3 位迄のものを抽出する機能追加を行った。

SERENA コードで定義出来る応力評価線の上限本数は 50 本であるため、自動設定で行う場合は、内面側節点グループと外面側節点グループの個数は、各々 7 個とするのが標準的な使用方法である。

応力評価線の自動設定の機能検証は 5 章にて行う。

#### (4) 3次元応力分類に係る機能追加

3次元応力分類では、応力評価線 10 本程度の応力分類の計算に約半日程度を要していたため、処理時間を短縮することを目的として、SERENA コード全体を見直し、下記の 3 項目を本コードに機能追加した。

- a) 扱うデータの量を少なくすることによる処理速度向上のために、対象としている応力評価線に関する要素・節点データのみを応力データファイルから読み取る機能
- b) データ指定の利便性向上のために、節点番号範囲指定と空間領域座標指定の 2 種類の指定を応力分類制御ファイルにて可能にする機能
- c) データファイルの読み込み速度向上のために、ABAQUS v6.8-1 のファイル拡張子 .fil のバイナリー型応力解析結果ファイルを読み込む機能

また、これらの 3次元応力分類の機能検証は 5 章にて行う。これらの機能追加により、従来の処理時間と比較して、処理時間が 1/100 倍で分類できることを確認した。

### 3.2 応力評価機能の整備

応力分類結果が格納された応力分類データファイルと応力評価方法を記述した制御ファイルにより、応力評価線での応力評価を行う機能に 3 項目の機能改良及び機能追加を行った。なお、応力評価結果は表形式で画面出力されるとともに、アスキー型式ファイルとして、ワークディレクトリに保存されるが、SERENA コードに付属する外字フォント(Eudc.tte)を Windows の OS にインストールすることにより、応力評価結果にある応力成分の添字部分等が正しく表示され

るシステムになっている。

#### (1) 表示欄の拡張

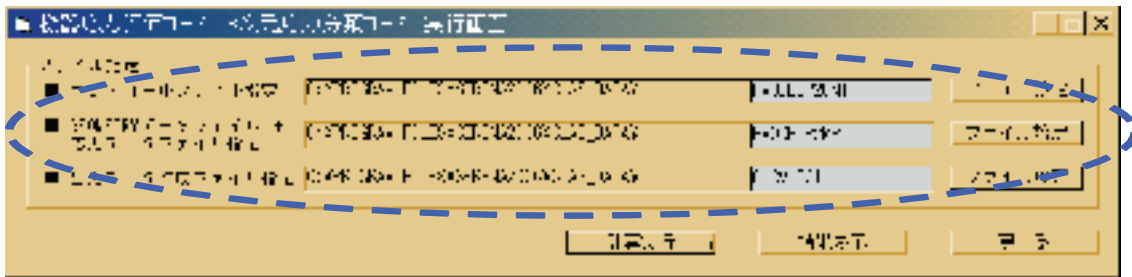
前章の応力分類と同様に、応力評価を実施する際の入力ファイルと出力ファイルを指定するファイルダイアログボックスを拡張し、トータルで 255 文字迄のファイル名に対応させた。図 3.4 に従来のウィンドウと機能改良したウィンドウを示す。機能改良により、応力評価の作業での視認性が向上した。

#### (2) プロセスモニターの機能追加

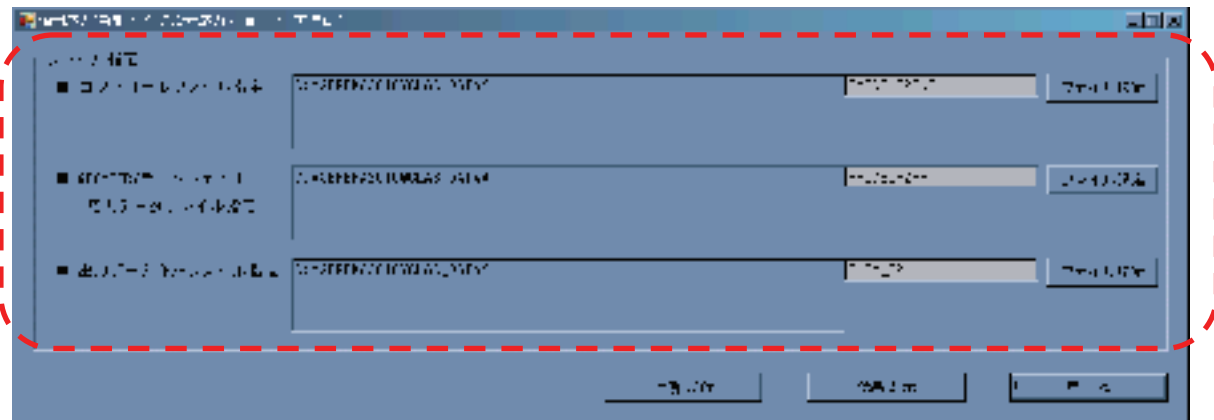
プロセスモニターは、応力分類や応力評価等のサブプログラムからプロセスモニターを呼び出す機能としおり、全てのサブプログラムから呼び出されるプロセスモニターは一つのため、機能等は 3.1(2)節で説明したものと同一である。

#### (3) 中間ファイル及び出力ファイルの初期削除

従来の応力評価の計算は、計算途中で使用されるワークファイルと出力予定ファイルの以前の計算に使用されていたものが、所定のワークディレクトリに存在し続けるために、新しい計算条件の応力評価を行って異常終了しても、以前の計算条件での結果が表示されてしまうため、ユーザーが異常終了を判別できなくなった。そこで、応力評価の計算を開始する時に、計算途中で使用されるワークファイルと出力予定ファイルを一度削除し、以前の計算条件での結果が混在しない設計とした。

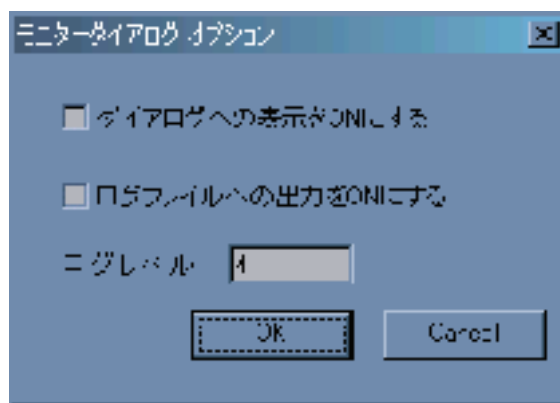


a) 従来の表示欄

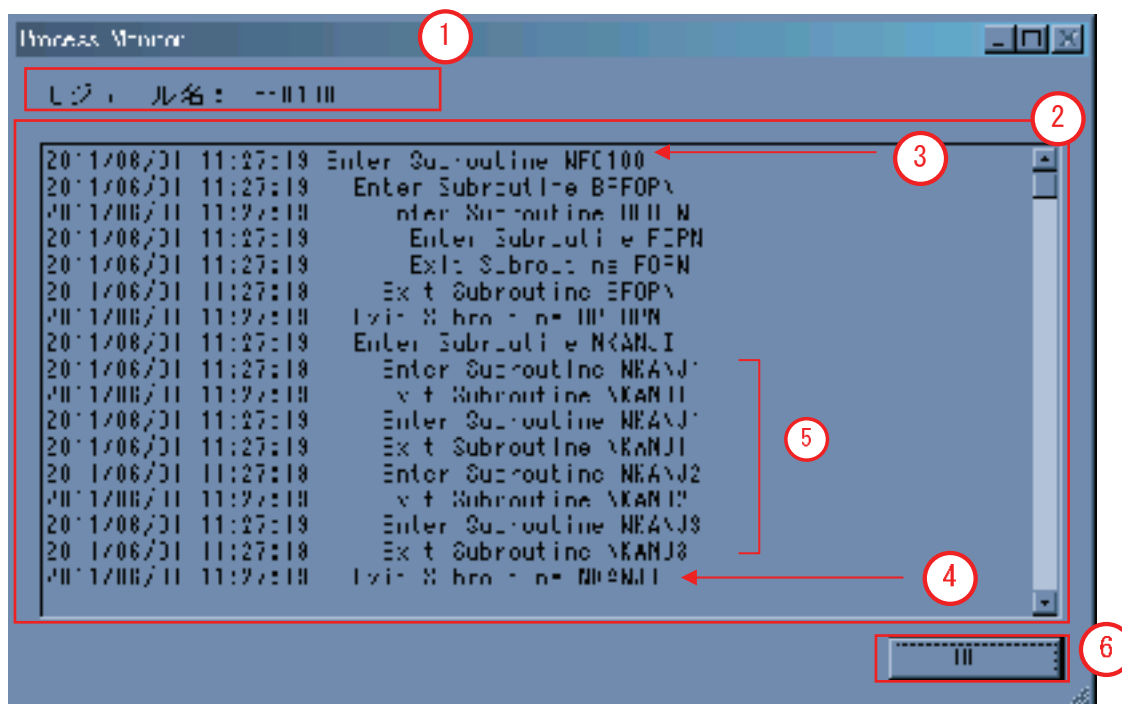


b) 改良した表示欄

図 3.1 応力分類機能でのファイルダイアログボックスの表示欄の拡張



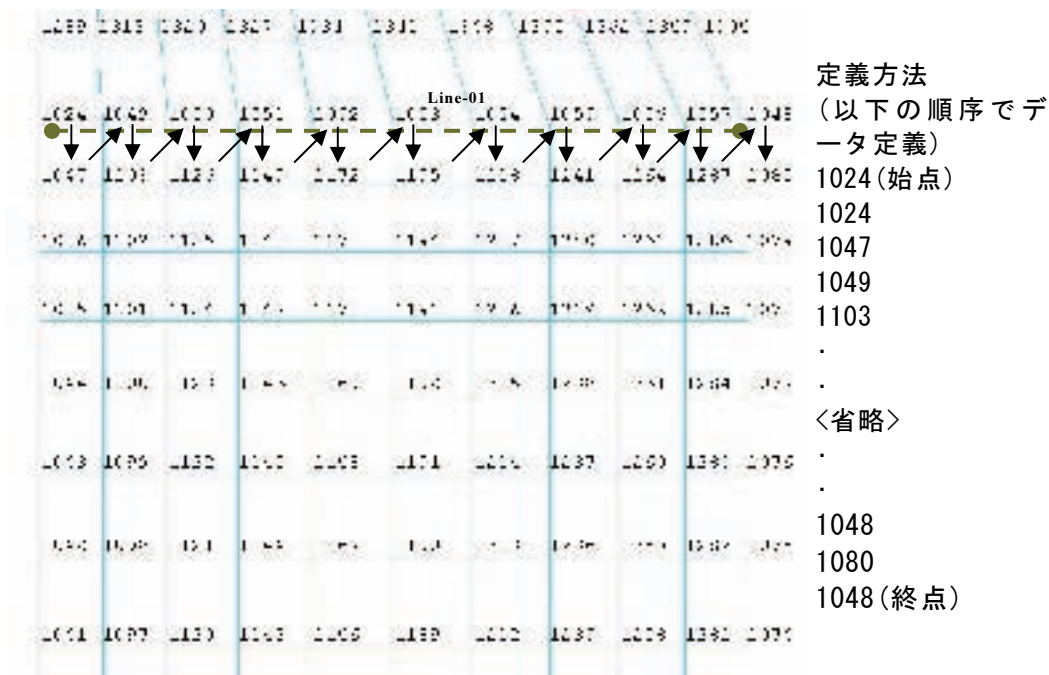
a) モニターダイアログオプションの画面



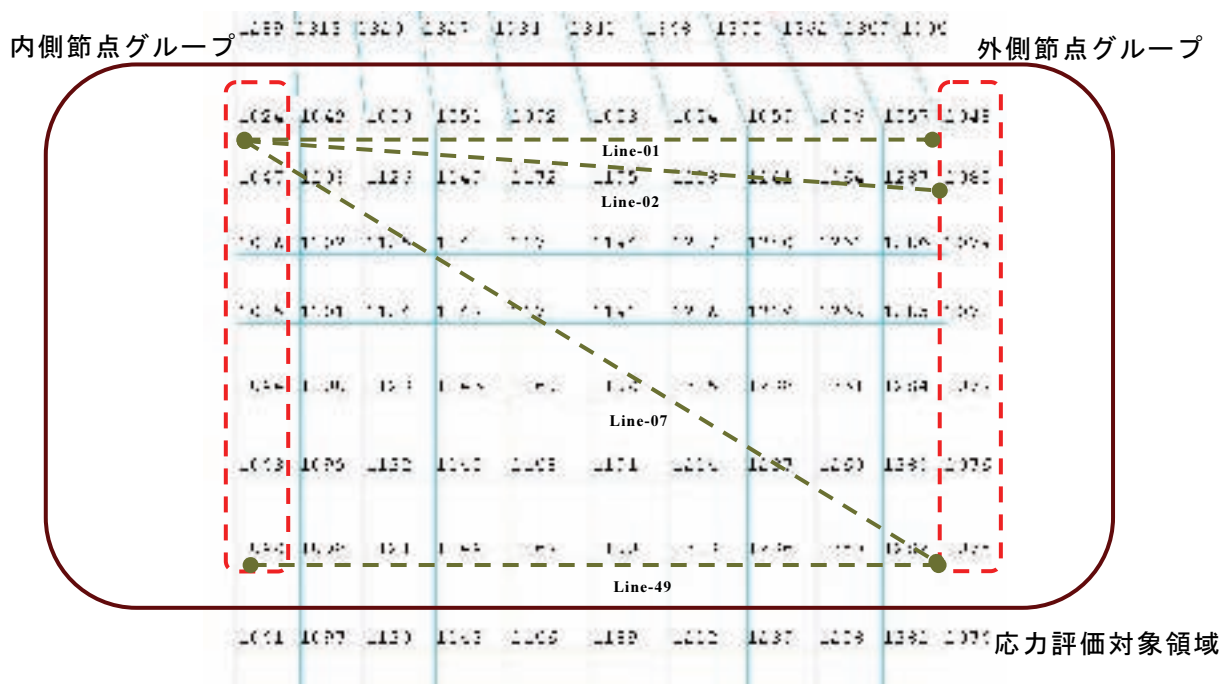
- ①実行中のモジュール名
- ②サブルーチンの計算開始、計算終了メッセージを出力して進行状況を表示
- ③サブルーチンの計算開始を表すメッセージ。
- ④サブルーチンの計算終了を表すメッセージ。
- ⑤サブルーチンから呼ばれたサブルーチンを表すメッセージ
- ⑥クリックする毎にメッセージの表示／非表示を切り替える  
 メッセージ表示のときのボタンのラベル：「OFF」  
 メッセージ非表示のときのボタンのラベル：「ON」

b) プロセスモニターの画面

図 3.2 プロセスモニター関連の画面

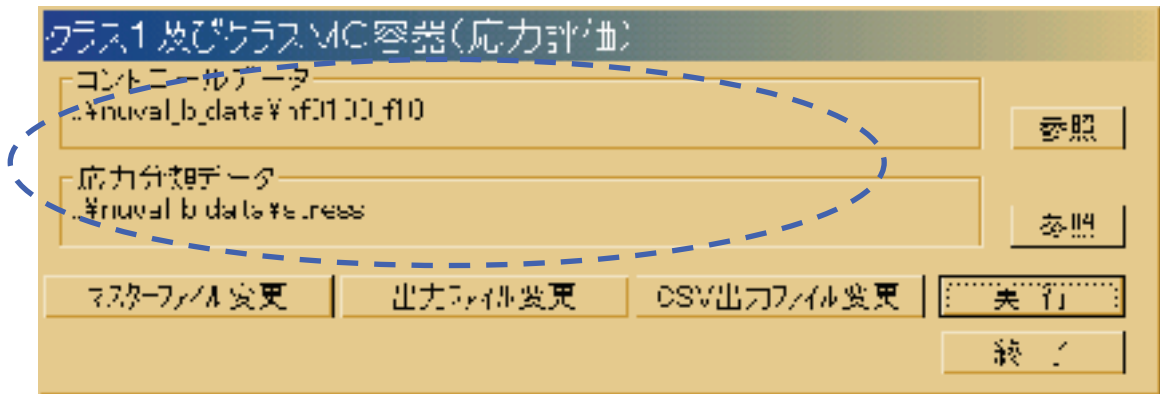


a) 従来のデータ作成方法 (節点応力指定の場合)

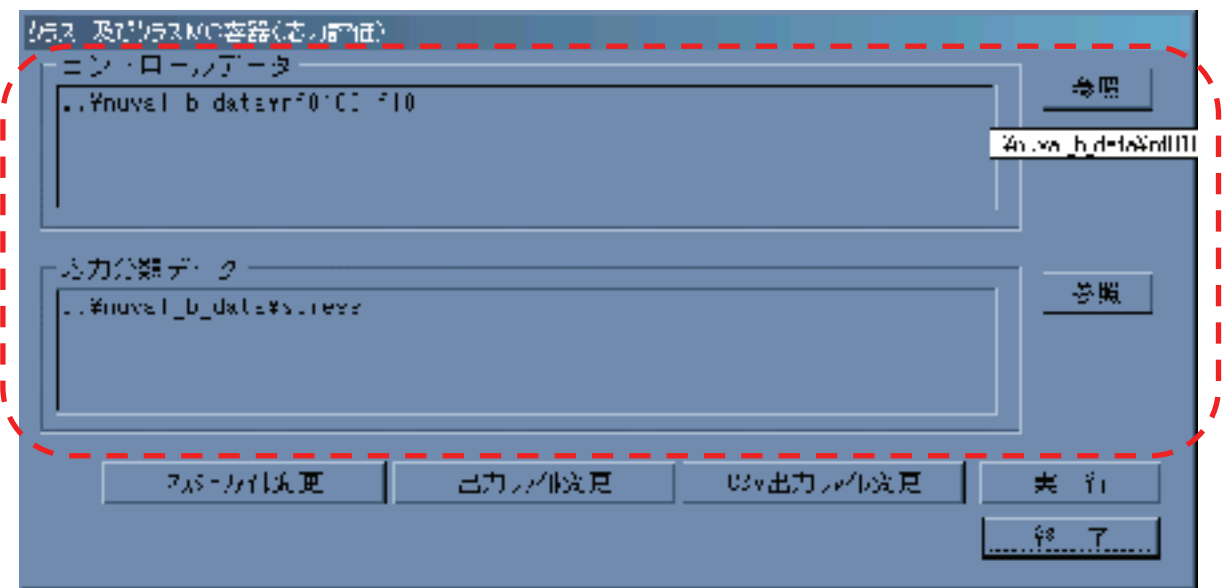


b) 自動データ作成方法

図 3.3 応力評価線のデータ作成方法



a) 従来の表示欄



b) 改良した表示欄

図 3.4 応力評価機能でのファイルダイアログボックスの表示欄の拡張



#### 4. スカート支持たて置円筒形容器の耐震強度評価方法の追加

JEAC4601-2008 は、耐震設計審査指針の改訂を受けて、原子力発電施設等の設備における代表的な容器について、主に、1)地震時鉛直方向荷重、2)耐震 S クラスの機器・配管系、3) 荷重組合せの SRSS 法等を考慮し、耐震強度評価方法の規程を定めている。本年度は、代表的な 5 種類の容器のうち、スカート支持たて置円筒形容器に関する JEAC4601-2008 に基づく耐震強度評価方法（以下、本耐震強度評価方法と言う。）を、JEAG の耐震強度評価方法に基づくプログラムを元に修正・追加し、SERENA コードに整備した。

##### (1) 計算条件

図 4.1 に計算条件を示す。SERENA コードでは、スカート部に設けられたマンホールは最大 3 つ迄評価に考慮出来る。振動特性評価を行う際は、1 質点の下端を固定された曲げせん断変形が可能なはりとして、計算モデル化されている。

##### (2) 評価項目

表 4.1 に評価順序と評価項目を示す。胴、スカート部及び基礎ボルトの 3 部位について応力評価を行うが、必要に応じて、胴及びスカートの 2 部位について座屈評価を行う。この座屈評価は、形状に係る適用範囲毎に実験式<sup>(1)</sup>を適用する。適用範囲に関連する変数の定義が、JEAG では外半径であったものが JEAC では平均半径に変更されており、本耐震強度評価方法に適正に反映した。

##### (3) 計算フロー

本耐震強度評価方法は、表 1.1 にある SERENA コードの階層構造上では、第 4 階層の主プログラムに当たり、FORTRAN にて記述されている。JEAG のスカート支持たて置円筒形容器の耐震強度評価方法のために記述されていたルーチンを活用し、必要な機能を修正・追加し、本耐震強度評価方法のコーディングを行った。図 4.2 に計算フローを示す。基礎ボルトの中立軸を定めるルーチンでは、収束計算を行っている。

##### (4) 入力画面

JEAG のスカート支持たて置円筒形容器の耐震強度評価方法のために設計されていた入力画面を活用し、必要な機能を修正と追加を行い、本耐震強度評価方法での評価に必要な全ての項

目に関して入力出来る画面を設計した。図 4.4 に入力画面を示す。応力の単位を  $\text{N/mm}^2$  から MPa に変更し、鉛直方向設計震度の入力項目を設けるとともに、耐震設計審査改訂指針に規定されている設計用地震動 Ss と Sd 等の入力項目を設けた。

#### (5) 入力データ構造

上記(4)の入力画面にて入力されたデータは、プログラムの動作上、一度データファイルとして保存することで初めて、評価を開始する条件が整う。図 4.5 に入力データファイルの中味を示す。赤枠で示した箇所が本耐震強度評価方法のために、新規に設けたデータである。

#### (6) 許容値

SERENA コードは、JSME 設計・建設規格に基づく材料の各温度における許容引張応力 S、設計降伏点  $S_y$ 、設計引張強さ  $S_u$  の 3 種類のデータをデータベースとして有し、運転温度での許容応力を算出する仕組みとなっている。データベースの全データについて、JSME 設計・建設規格との比較検査を行い、全てのデータが適正であり、許容応力が正しく算出されることを確認した。

#### (7) 評価結果

本耐震強度評価方法の主プログラムと同等な計算機能を持つ EXCEL VBA を作成し、これを用いて、本耐震強度評価方法の評価結果との比較を通して、本耐震強度評価方法の検証を行い、適正に評価が行われることを確認した。

JEAG の評価方法に基づく耐震強度評価方法では絶対値和法の評価結果のみを表示させたが、本耐震強度評価方法では絶対値和法に加え SRSS 法での評価結果も同時に表示させる出力方法を採用した。

#### (8) まとめ

本耐震強度評価方法を SERENA コードに整備し、適正に作動することを確認した。

耐震強度評価	
1	振動特性評価
2	胴の応力評価・座屈評価
3	スカートの応力評価・座屈評価
4	基礎ボルトの応力評価

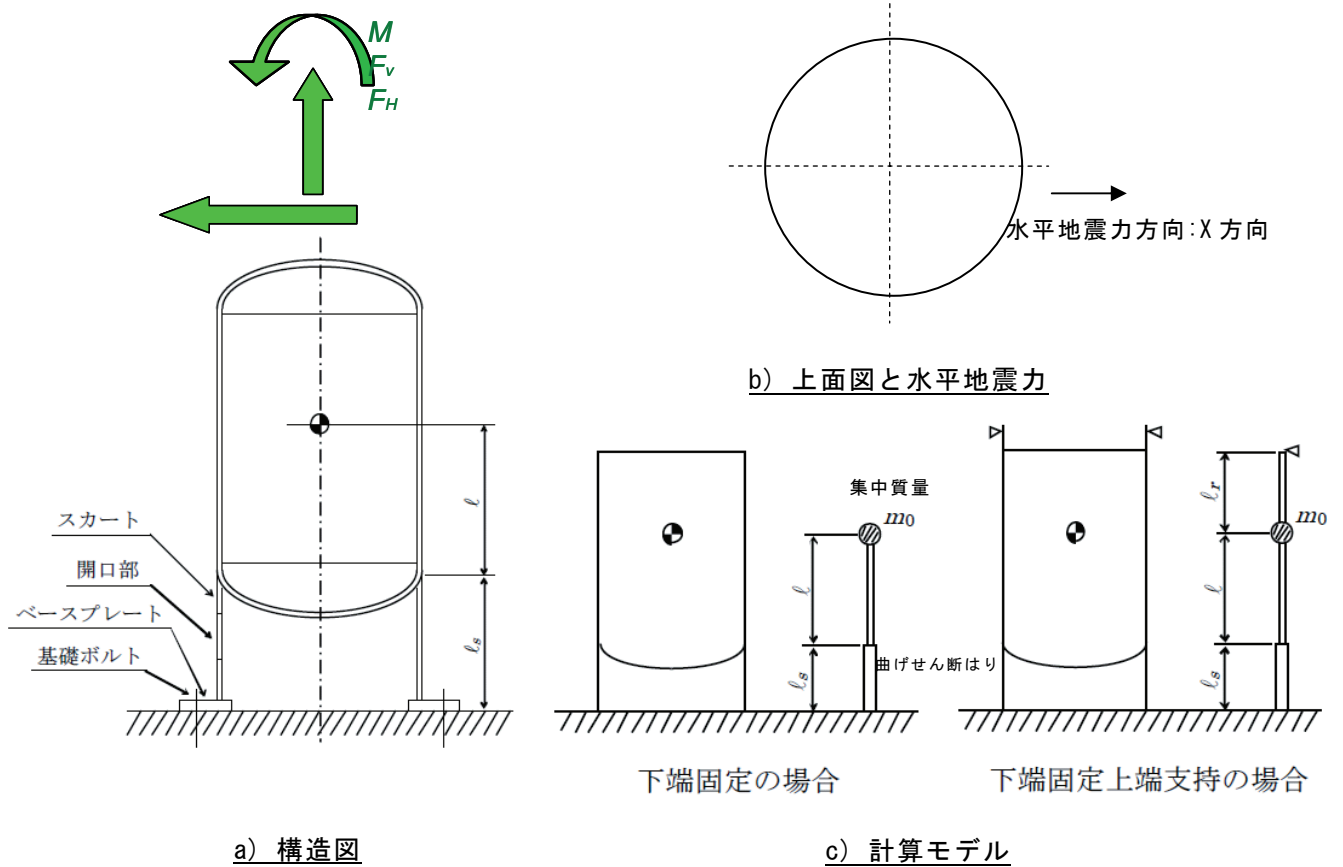
a) 評価順序

耐震クラス	供用状態	考慮すべき 地震方向	評価										
			胴				スカート		基礎ボルト				
			一次一般 膜応力	一次応力	一次+二次 応力	一次+二次 +ピク 力	座屈	引張応力	座屈	引張応力	せん断応力		
S	Cs/Ds	水平/鉛直	○	○	○	○	△	○	○	△	○	○	○
B,C	Cs	水平	○	○	-	-	△	○	○	△	○	○	○

○: 評価要  
△: 場合により評価  
-: 評価不要

b) 評価項目

表 4.1 本耐震強度評価方法の評価順序と評価項目



**スカート支持たて置円筒形容器の耐震強度評価方法の計算条件**

- (a) 容器の質量は、重心位置に集中させる。  
(1 質点系モデル)
- (b) スカート下端部は、固定端とする。
- (c) 容器頂部に水平方向変位を拘束する構造物が設けられている場合は、その部分をピン支持とする。
- (d) スカートに、マンホールなどの開口部があって補強されていない場合は欠損の影響を考慮する。
- (e) 容器及びスカートは鉛直方向に剛とみなす。
- (f) 水平方向については、容器及びスカートをはりと考えたときの曲げ変形及びせん断変形を考慮する。
- (g) 地震力は、容器に対して水平方向及び鉛直方向から個別に作用させて応力を計算し、強度評価において各応力を組み合わせる。

鉛直地震力方向	鉛直方向
水平地震力方向	X方向
荷重の組合せ法	絶対和法/SRSS法
容器下端部条件	固定
容器上端部条件	支持/自由

青字:JEAC4601から導入

図 4.1 本耐震強度評価方法の計算条件

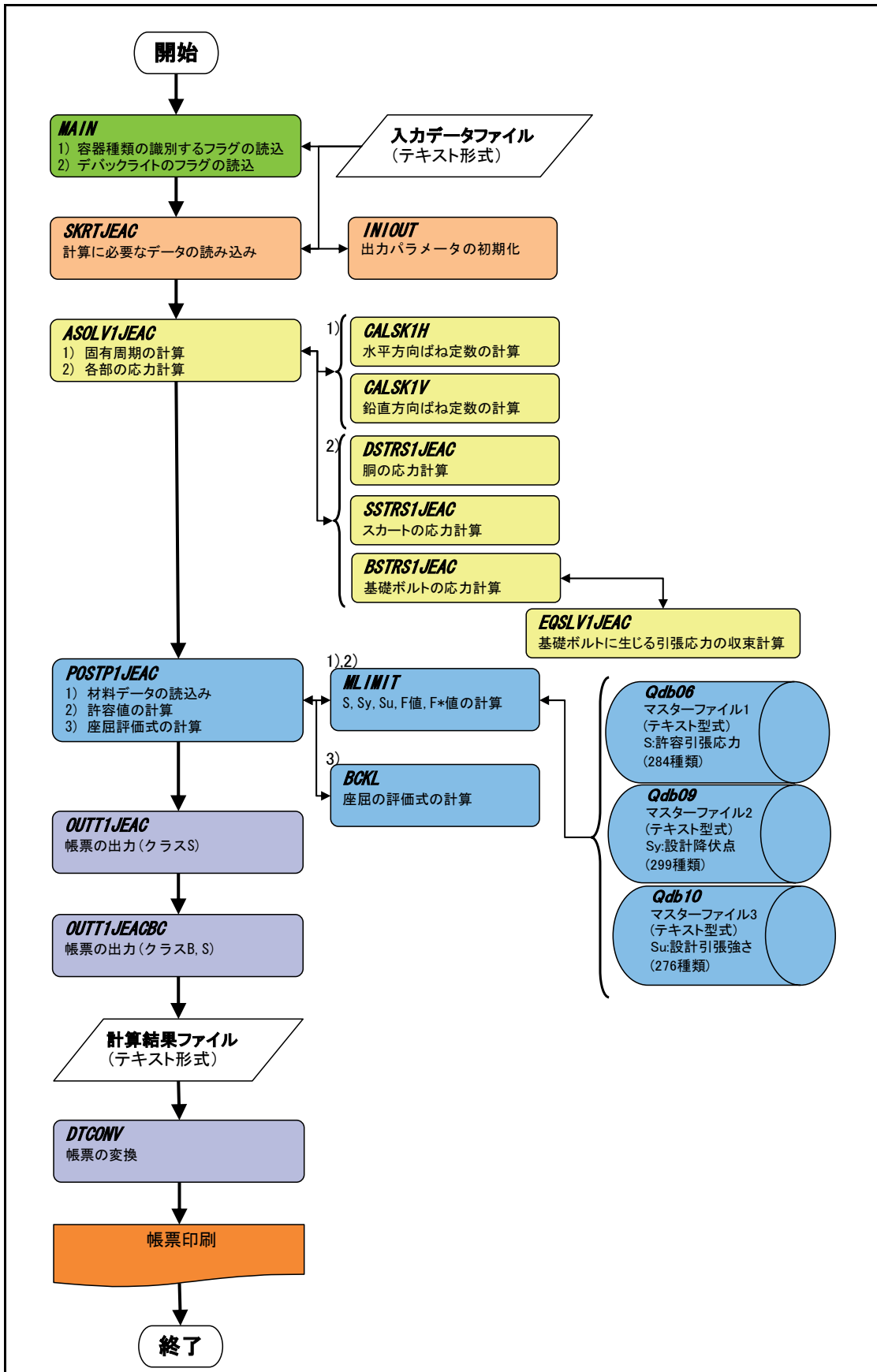
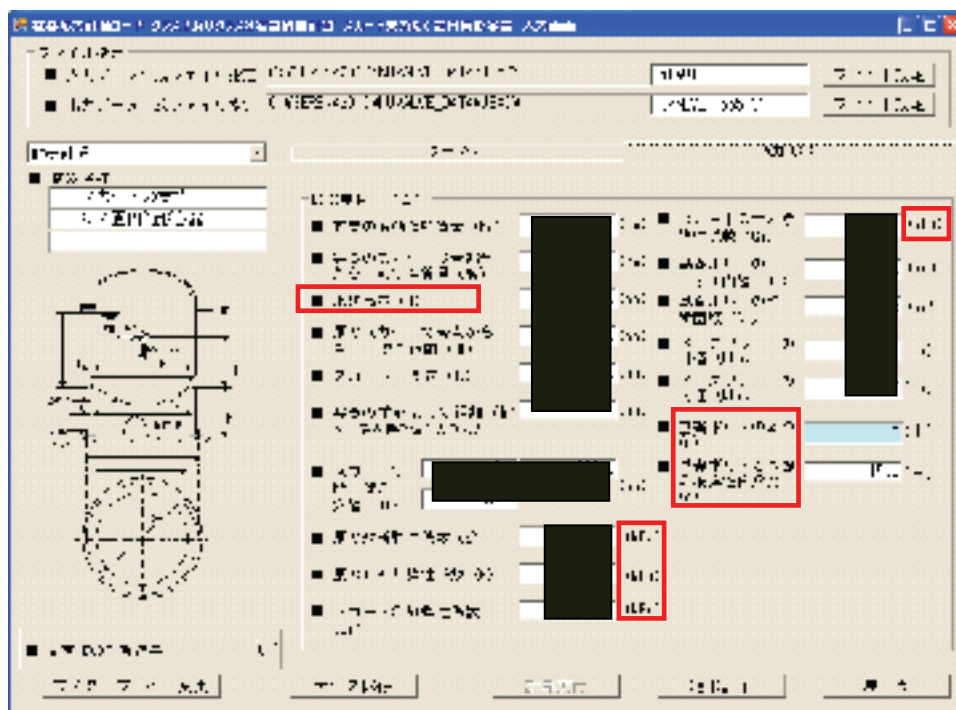


図 4.2 本耐震強度評価方法プログラムのサブルーチン等の相関関係と計算フロー



a) 機器要目の第1入力画面



b) 機器要目の第2入力画面

\*1 黒枠は、事業者機密に属するため、非公開。  
 \*2 赤枠は、JEAC2008-2008に基づく修正・追加箇所。

図 4.3 本耐震強度評価方法の入力画面

1 スカートの支持		1 たて置円筒形容器				
S 設置場所 A A A		0. 5				
SUSF321	SUSF321	SNB7				
0.67	0.42	0.40	0.29	0.28	0.27	
3.2362	90.0	50.0	1.0			
1200.0	22.0	1245.0	22.0			
1132.0	520.0	200.0	600.0			
0.0	102.3	102.3				
1420.0	452.3	1500.0	1050.0	6		
191230.	73550.					
192210.	73844.					
15.0						
28439.29	18632.64					

\* 赤枠は、JEAC2008-2008 に基づく修正・追加箇所

図 4.4 本耐震強度評価方法の入力データ構造



## 5. 応力分類機能の検証

3 章で実施した応力分類機能の機能改良及び機能追加に関し、以下の 3 項目の確認と検討を通して、適正に機能することを検証した。

- ・ 応力評価線の自動設定の機能確認
- ・ 応力評価線の代表の抽出の機能確認
- ・ 計算精度の検討

圧力荷重が負荷された単純な形状の球殻及び円筒で構成される容器を対象にした 2 次元軸対称解析モデルを対象にして、汎用有限要素法構造解析ソルバー ABAQUS ver6.8-1 を用いた応力解析の実施の後に応力分類を行った。この解析モデルの円筒端部と球殻頂上部の様な代表的な部位での応力分類の計算値は、理論解による予測が可能であり、応力分類結果と理論値との比較により各機能を確認した。

### 5.1 検証モデル

検証に用いる 2 次元軸対称解析モデルを図 5.1 に示す。荷重条件は容器内面側に均一な内圧荷重 10(MPa)を負荷している。また、図 5.1a)に示す部位の E-1~3 が後述で理論値との比較を行う代表的な部位である。

### 5.2 2次元軸対称解析モデルでの検証

#### 5.2.1 応力評価線の自動設定と代表抽出

##### (1) 応力評価線の自動設定の機能確認

図 5.1b)の拡大図にある内面側節点グループと外面側節点グループを用いて、検証解析モデルの応力評価線 3~23 を自動設定するデータを作成し、その結果を表 5.1 に示す応力分類制御データを入力ファイル 1 として設定する。さらに、ABAQUS による応力解析結果を入力ファイル 2 として設定した上で応力分類機能を作動させると、表 5.2 に示す中間ファイルを作成する。この中間ファイルが最終的な応力分類制御データであり、データとして定義された節点の節点応力に基づき応力分類を行う。従って、この中間ファイルに格納されている応力評価線 3 のデータに着目し、図 5.2 に示す解析モデルの応力評価線 3 のために定義された節点が、データ定義方法として正しいことを確認し、応力評価線の自動設定の機能を確認した。

## (2) 応力評価線の代表抽出の機能確認

応力評価対象領域での代表の抽出は、応力 6 成分及び応力強さの 7 種類の成分ごとに、一次一般膜応力、一次膜＋一次曲げ応力（内面と外面）、一次＋二次応力（内面と外面）並びに一次＋二次＋ピーク応力（内面と外面）の 7 つの応力に分類されたもののうち、上位 3 位の評価線を抽出する。検証解析モデルを用いて、この代表線の抽出の機能検証を行った。解析モデルと入力データファイルは前項(1)と同一とし、代表線抽出の結果を表 5.3 に示す。応力評価部位円筒部<E-1>応力評価線 1P01P02 はこの検証モデルの中で最も周方向応力  $\sigma_t$  が高くなる位置であり、表 5.3 中の青枠で囲っている部分が応力評価線の代表抽出となっていることが確認出来た。

### 5.2.2 2次元軸対称解析モデルでの計算精度の検討

機能改良を行ったことにより、計算精度への影響が無いことを理論値と応力分類結果の計算値とを比較し、確認した。

#### (1) 厚肉円筒の理論値

内圧荷重を受ける厚肉円筒に生じる応力の理論値は下式である。

$$\sigma_{\theta}(r) = \frac{r_i^2 p}{r_o^2 - r_i^2} \left( \frac{r_o^2}{r^2} + 1 \right) \quad (5.1)$$

$$\sigma_l(r) = \frac{r_i^2 p}{r_o^2 - r_i^2} \quad (5.2)$$

$$\sigma_r(r) = \frac{r_i^2 p}{r_o^2 - r_i^2} \left( \frac{r_o^2}{r^2} - 1 \right) \quad (5.3)$$

ここに、 $p$ :内圧、 $r_o$ :外径、 $r_i$ :内径

以下に、円筒の場合も球殻の場合も共通の応力分類成分の定式を示す。

$\theta$  方向の膜応力は、下式で表される。

$$\sigma_{\theta}^m = \frac{1}{t} \int_{r_i}^{r_o} \sigma_{\theta}(r) \left( 1 + \frac{r - (r_o + r_i)/2}{\rho} \right) dr \quad (5.4)$$

ここで  $t$  は板厚 ( $= (r_o - r_i)$ ) であり、 $\rho$  は容器中立面と評価線の交点における曲率半径である。

円筒の場合は、 $\rho = \infty$  となる。

$\theta$  方向の内面側の曲げ応力は、下式で表される。

$$\sigma_{\theta}^b(r_i) = \frac{-(r_o - r_i)/2 - x_h}{t(t^2/12 - x_h^2)} \int_{r_i}^{r_o} \left( r - \frac{r_o + r_i}{2} - x_h \right) \sigma_{\theta}(r) \left( 1 + \frac{r - (r_o + r_i)/2}{\rho} \right) dr \quad (5.5)$$

ここで  $x_h = \frac{t^2}{12\rho}$  である。

$\theta$  方向の外面側の曲げ応力は、下式で表される。

$$\sigma_\theta^b(r_o) = \frac{(r_o - r_i)/2 - x_h}{t(t^2/12 - x_h^2)} \int_{r_i}^{r_o} \left( r - \frac{r_o + r_i}{2} - x_h \right) \sigma_\theta(r) \left( 1 + \frac{r - (r_o + r_i)/2}{\rho} \right) dr \quad (5.6)$$

$r$  方向の膜応力は、下式で表される。

$$\sigma_r^m = \frac{1}{t} \int_{r_i}^{r_o} \sigma_r(r) dr \quad (5.7)$$

$r$  方向の内面側の曲げ応力は、下式で表される。

$$\sigma_r^b(r_i) = \frac{-(r_o - r_i)/2 - x_h}{t(t^2/12 - x_h^2)} \int_{r_i}^{r_o} \left( r - \frac{r_o + r_i}{2} - x_h \right) \sigma_r(r) \left( 1 + \frac{r - (r_o + r_i)/2}{\rho} \right) dr \quad (5.8)$$

$r$  方向の外面側の曲げ応力は、下式で表される。

$$\sigma_r^b(r_o) = \frac{(r_o - r_i)/2 - x_h}{t(t^2/12 - x_h^2)} \int_{r_i}^{r_o} \left( r - \frac{r_o + r_i}{2} - x_h \right) \sigma_r(r) \left( 1 + \frac{r - (r_o + r_i)/2}{\rho} \right) dr \quad (5.9)$$

$\theta$  方向と  $r$  方向の内面側のピーク応力は、下式で表される。

$$\sigma_j^p(r_i) = \sigma_j(r_i) - \sigma_j^m - \sigma_j^b(r_i) \quad (5.10)$$

ここで  $j$  は応力成分の方向を表す。

$\theta$  方向と  $r$  方向の外面側のピーク応力は、下式で表される。

$$\sigma_j^p(r_o) = \sigma_j(r_o) - \sigma_j^m - \sigma_j^b(r_o) \quad (5.11)$$

## (2) 厚肉球殻の理論値

内圧荷重を受ける厚肉球殻に生じる応力の理論値は下式である。

$$\sigma_\theta(r) = \frac{r_i^3 p}{r_o^3 - r_i^3} \left( \frac{r_o^3}{2r^3} + 1 \right) \quad (5.12)$$

$$\sigma_r(r) = \frac{r_i^3 p}{r_o^3 - r_i^3} \left( \frac{r_o^3}{r^3} - 1 \right) \quad (5.13)$$

$$\sigma_l(r) = \sigma_\theta(r) \quad (5.14)$$

$\theta$  方向の膜応力は、下式で表される。

$$\sigma_\theta^m = \frac{1}{t} \int_{r_i}^{r_o} \sigma_\theta(r) dr \quad (5.15)$$

$\theta$  方向の内面側の曲げ応力は、下式で表される。

$$\sigma_\theta^b(r_i) = \frac{-(r_o - r_i)/2 - x_h}{t(t^2/12 - x_h^2)} \int_{r_i}^{r_o} \left( r - \frac{r_o + r_i}{2} - x_h \right) \sigma_\theta(r) \left( \frac{r}{(r_o + r_i)/2} \right) dr \quad (5.16)$$

ここで  $x_h = \frac{t^2}{12\rho}$  である。

$\theta$  方向の外側側の曲げ応力は、下式で表される。

$$\sigma_{\theta}^b(r_o) = \frac{(r_o - r_i)/2 - x_h}{t(t^2/12 - x_h^2)} \int_{r_i}^{r_o} \left( r - \frac{r_o + r_i}{2} - x_h \right) \sigma_{\theta}(r) \left( \frac{r}{(r_o + r_i)/2} \right) dr \quad (5.17)$$

$r$  方向の膜応力は、下式で表される。

$$\sigma_r^m = \frac{1}{t} \int_{r_i}^{r_o} \sigma_r(r) dr \quad (5.18)$$

$r$  方向の内側側の曲げ応力は、下式で表される。

$\theta$  方向と  $r$  方向の内側側のピーク応力は、下式で表される。

$$\sigma_j^p(r_i) = \sigma_j(r_i) - \sigma_j^m - \sigma_j^b(r_i) \quad (5.19)$$

ここで  $j$  は応力成分の方向を表す。

$\theta$  方向と  $r$  方向の外側側のピーク応力は、下式で表される。

$$\sigma_j^p(r_o) = \sigma_j(r_o) - \sigma_j^m - \sigma_j^b(r_o) \quad (5.20)$$

### (3) 計算値と理論値の比較

表 5.4 は検証モデルの代表的な位置での内面と外面での、一次一般膜応力、一次膜＋一次曲げ応力、一次＋二次応力、一次＋二次＋ピーク応力を分類したものと前項(1)及び(2)での理論値を比較したものである。

応力分類の理論上、2次元軸対称モデルで回転中心軸上にある応力評価線<sup>(10)</sup>は解が不定になるために、球殻頂上部<E-3>の評価線 25 の評価線は回転中心軸から平行に 10(mm)離れた位置に設定したが、理論値との大きな乖離が見られないため、問題無いと考えられる。検証解析モデルの最大誤差は、球殻頂上部での球殻頂上部<E-3>の評価線 25 の内面側  $\sigma_r$  の一次膜＋一次曲げ応力の赤枠で囲っている 34.73(%)であり、円筒部<E-1>と円筒部<E-2>でも内面側  $\sigma_r$  の一次膜＋一次曲げ応力(青枠で囲っている箇所)が理論値と-12.74(%)程度異なるが、計算値と理論値との差異は 0.1(MPa)以内にあるため、計算誤差の観点から問題無いと考えられる。また、一次膜＋一次曲げ＋ピーク応力の内面側の径方向応力  $\sigma_r$  は最小-2.3(%)と理論値より小さくなる傾向にあるが、これらの誤差の原因はソルバー ABAQUS の解析結果そのもので応力分類は適正に機能しており、機能改良により SERENA コードの計算精度への影響が無いことが確認できた。

表 5.1 検証解析モデルの応力分類制御データ

TITLE	MODEL_1						TEST(model_1_cntl_110704.txt)			
1										
25	4	1	0	1	1	0	ABAQUS	0		
1	0	0	0	1	87	1				
2	26	0	0	-1						
		900.00	1500.00		1000.00	1500.00				
	40	39	207	208	266	267	325	326	384	385
	444	443	502	503	561	562	620	621	679	680
	738	739	798	797	856	857	915	916	974	975
	1034	1033	1092	1093	1151	1152	1211	1210	1269	1270
	1328	1329	1388	1387	1446	1447	1505	1506	1564	1565
	110	109								
3	0	0	0	1622	1652	1				
4	0	0	0	1623	1651	1				
5	0	0	0	1623	1650	1				
6	0	0	0	1623	1625	1				
7	0	0	0	1624	1651	1				
8	0	0	0	1624	1650	1				
9	0	0	0	1624	1625	1				
10	0	0	0	1624	2654	1				
11	0	0	0	1587	1651	1				
12	0	0	0	1587	1650	1				
13	0	0	0	1587	1625	1				
14	0	0	0	1587	2654	1				
15	0	0	0	1587	2653	1				
16	0	0	0	2576	1650	1				
17	0	0	0	2576	1625	1				
18	0	0	0	2576	2654	1				
19	0	0	0	2576	2653	1				
20	0	0	0	2577	1625	1				
21	0	0	0	2577	2654	1				
22	0	0	0	2577	2653	1				
23	0	0	0	2578	2652	1				
24	26	0	0	-1						
		636.387	3636.387		707.097	3707.096				
	3345	3344	3594	3593	3706	3705	3818	3817	3930	3929
	4042	4041	4154	4153	4266	4265	4378	4377	4490	4489
	4602	4601	4714	4713	4826	4825	4938	4937	5050	5049
	5162	5161	5274	5273	5386	5385	5498	5497	5610	5609
	5722	5721	5834	5833	5946	5945	6058	6057	6170	6169
	3511	3512								
25	0	0	0	3303	3416	1				
TOP	1	1111111	1111111	1111111	1111111	1111111	1111111	1111111	1111111	1111111



表 5.3(1/3) 応力評価線の代表抽出

**** TOP 3 **** B E G I N				
STEP 1				
	MAX STRESS LINE	VALUE	MAX S.I.	STEP
"Pm","COMP=1"				
1	L01 1P01P02	89.913	94.563	1
2	L01 1P03P04	89.870	94.520	1
3	L01 1P05P06	68.516	73.300	1
"Pm","COMP=2"				
1	L01 2P49P50	42.805	47.463	1
2	L01 2P45P46	42.676	69.344	1
3	L01 2P37P38	42.675	70.133	1
"Pm","COMP=3"				
1	L01 3P21P22	-2.718	71.861	1
2	L01 3P31P32	-3.155	71.222	1
3	L01 3P39P40	-3.461	70.557	1
"Pm","COMP=5"				
1	L01 5P11P12	4.089	71.656	1
2	L01 5P19P20	2.848	71.025	1
3	L01 5P29P30	1.837	70.355	1
"Pm","MAX S.I."				
1	L01 *P01P02	94.563	94.563	1
2	L01 *P03P04	94.520	94.520	1
3	L01 *P05P06	73.300	73.300	1
"PL+Pb(in)","COMP=1"				
1	L01 1P01P02	89.913	94.563	1
2	L01 1P03P04	89.870	94.520	1
3	L01 1P05P06	68.516	73.300	1
"PL+Pb(in)","COMP=2"				
1	L01 2P49P50	42.805	47.463	1
2	L01 2P45P46	42.676	69.344	1
3	L01 2P37P38	42.675	70.133	1
"PL+Pb(in)","COMP=3"				
1	L01 3P21P22	-2.718	71.861	1
2	L01 3P31P32	-3.155	71.222	1
3	L01 3P39P40	-3.461	70.557	1
"PL+Pb(in)","COMP=5"				
1	L01 5P11P12	4.089	71.656	1
2	L01 5P19P20	2.848	71.025	1
3	L01 5P29P30	1.837	70.355	1
"PL+Pb(in)","MAX S.I."				
1	L01 *P01P02	94.563	94.563	1
2	L01 *P03P04	94.520	94.520	1
3	L01 *P05P06	73.300	73.300	1
"PL+Pb(out)","COMP=1"				
1	L01 1P01P02	89.913	94.563	1
2	L01 1P03P04	89.870	94.520	1
3	L01 1P05P06	68.516	73.300	1
"PL+Pb(out)","COMP=2"				
1	L01 2P49P50	42.805	47.463	1
2	L01 2P45P46	42.676	69.344	1
3	L01 2P37P38	42.675	70.133	1
( 続く ⊕ )				

注) 青枠内は応力評価線の代表

表 5.3(2/3) 応力評価線の代表抽出

(続き㊸)					
"PL+Pb(out)","COMP=3"					
1	L01	3P21P22	-2.718	71.861	1
2	L01	3P31P32	-3.155	71.222	1
3	L01	3P39P40	-3.461	70.557	1
"PL+Pb(out)","COMP=5"					
1	L01	5P11P12	4.089	71.656	1
2	L01	5P19P20	2.848	71.025	1
3	L01	5P29P30	1.837	70.355	1
"PL+Pb(out)","MAX S.I."					
1	L01	*P01P02	94.563	94.563	1
2	L01	*P03P04	94.520	94.520	1
3	L01	*P05P06	73.300	73.300	1
"PL+Pb+Q(in)","COMP=1"					
1	L01	1P01P02	94.960	104.657	1
2	L01	1P03P04	94.919	104.617	1
3	L01	1P05P06	71.243	81.260	1
"PL+Pb+Q(in)","COMP=2"					
1	L01	2P45P46	46.533	78.799	1
2	L01	2P43P44	45.641	79.137	1
3	L01	2P47P48	45.312	54.939	1
"PL+Pb+Q(in)","COMP=3"					
1	L01	3P21P22	-7.608	79.648	1
2	L01	3P31P32	-8.008	79.363	1
3	L01	3P39P40	-8.268	79.010	1
"PL+Pb+Q(in)","COMP=5"					
1	L01	5P11P12	4.773	80.913	1
2	L01	5P19P20	3.505	80.423	1
3	L01	5P29P30	2.437	79.915	1
"PL+Pb+Q(in)","MAX S.I."					
1	L01	*P01P02	104.657	104.657	1
2	L01	*P03P04	104.617	104.617	1
3	L01	*P05P06	81.260	81.260	1
"PL+Pb+Q(out)","COMP=1"					
1	L01	1P01P02	85.039	84.816	1
2	L01	1P03P04	84.995	84.771	1
3	L01	1P05P06	65.883	65.615	1
"PL+Pb+Q(out)","COMP=2"					
1	L01	2P05P06	45.147	65.615	1
2	L01	2P07P08	43.961	64.543	1
3	L01	2P09P10	43.310	63.595	1
"PL+Pb+Q(out)","COMP=3"					
1	L01	3P21P22	2.004	64.341	1
2	L01	3P31P32	1.530	63.362	1
3	L01	3P39P40	1.182	62.395	1
"PL+Pb+Q(out)","COMP=5"					
1	L01	5P11P12	3.429	62.719	1
2	L01	5P19P20	2.214	61.953	1
3	L01	5P29P30	1.258	61.129	1
"PL+Pb+Q(out)","MAX S.I."					
1	L01	*P01P02	84.816	84.816	1
2	L01	*P03P04	84.771	84.771	1
3	L01	*P05P06	65.615	65.615	1
(続く㊹)					

注) 青枠内は応力評価線の代表

表 5.3(3/3) 応力評価線の代表抽出

(続き⑧)						
"PL+Pb+Q+F(in)","COMP=1"						
1	L01	1P01P02	95.030	104.797		1
2	L01	1P03P04	94.989	104.757		1
3	L01	1P05P06	71.254	80.989		1
"PL+Pb+Q+F(in)","COMP=2"						
1	L01	2P45P46	47.041	79.217		1
2	L01	2P43P44	46.061	79.472		1
3	L01	2P41P42	45.858	79.472		1
"PL+Pb+Q+F(in)","COMP=3"						
1	L01	3P21P22	-8.502	79.881		1
2	L01	3P11P12	-8.745	80.533		1
3	L01	3P31P32	-8.877	79.684		1
"PL+Pb+Q+F(in)","COMP=5"						
1	L01	5P11P12	7.054	80.533		1
2	L01	5P19P20	6.040	80.149		1
3	L01	5P29P30	5.159	79.881		1
"PL+Pb+Q+F(in)","MAX S.I."						
1	L01	*P01P02	104.797	104.797		1
2	L01	*P03P04	104.757	104.757		1
3	L01	*P05P06	80.989	80.989		1
"PL+Pb+Q+F(out)","COMP=1"						
1	L01	1P01P02	85.434	85.605		1
2	L01	1P03P04	85.390	85.561		1
3	L01	1P05P06	66.182	66.389		1
"PL+Pb+Q+F(out)","COMP=2"						
1	L01	2P05P06	45.409	66.389		1
2	L01	2P07P08	44.246	65.295		1
3	L01	2P13P14	43.960	65.295		1
"PL+Pb+Q+F(out)","COMP=3"						
1	L01	3P21P22	0.829	65.295		1
2	L01	3P11P12	0.664	63.142		1
3	L01	3P31P32	0.493	64.191		1
"PL+Pb+Q+F(out)","COMP=5"						
1	L01	5P11P12	5.748	63.142		1
2	L01	5P19P20	4.526	62.269		1
3	L01	5P29P30	3.526	61.479		1
"PL+Pb+Q+F(out)","MAX S.I."						
1	L01	*P01P02	85.605	85.605		1
2	L01	*P03P04	85.561	85.561		1
3	L01	*P05P06	66.389	66.389		1
**** TOP 3 **** E N D						

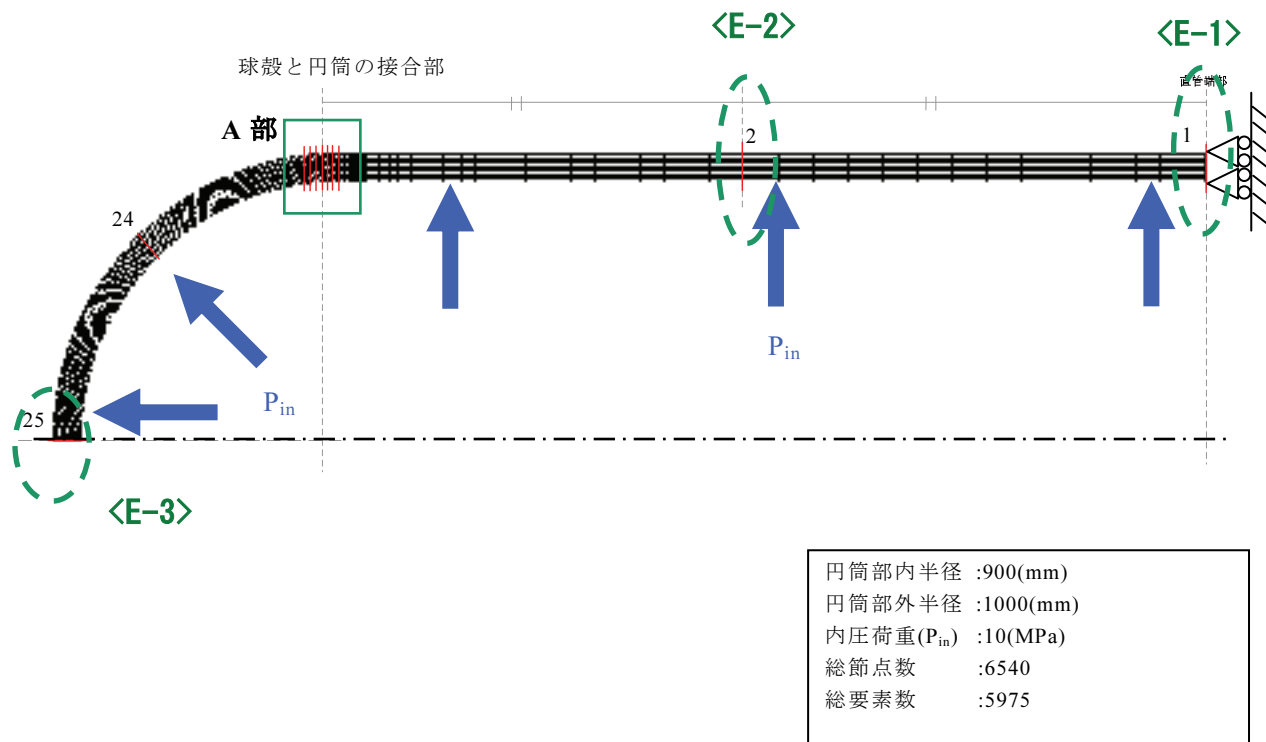
注) 青枠内は応力評価線の代表

表 5.4 検証解析モデルの計算値と理論値の比較

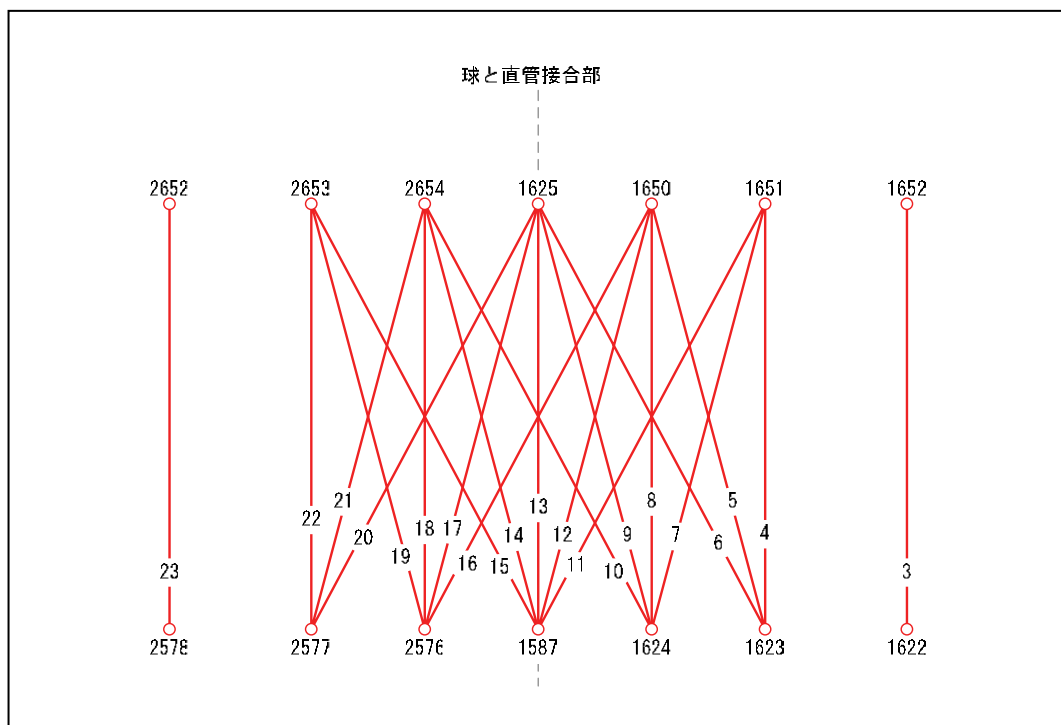
部位	評価線	応力成分		一次一般膜応力	一次膜+一次曲げ応力		一次膜+一次曲げ+ピーク応力	
					内面	外面	内面	外面
円筒部 <E-1>	1	$\sigma_t$	計算値(MPa)	89.91	94.96	85.04	95.03	85.43
			理論値(MPa)	90.00	94.99	85.01	95.26	85.26
			誤差(%)	-0.10	-0.03	0.03	-0.24	0.20
		$\sigma_l$	計算値(MPa)	42.63	42.63	42.63	42.63	42.63
			理論値(MPa)	42.63	42.63	42.63	42.63	42.63
			誤差(%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		$\sigma_r$	計算値(MPa)	-4.65	-9.70	0.22	-9.77	-0.17
			理論値(MPa)	-4.74	-9.73	0.25	-10.00	0.00
			誤差(%)	-1.83	-0.27	-12.74	-2.30	--
円筒部 <E-2>	2	$\sigma_t$	計算値(MPa)	89.87	94.92	85.00	94.99	85.39
			理論値(MPa)	90.00	94.99	85.01	95.26	85.26
			誤差(%)	-0.14	-0.07	-0.01	-0.29	0.15
		$\sigma_l$	計算値(MPa)	42.63	42.65	42.62	42.65	42.62
			理論値(MPa)	42.63	42.63	42.63	42.63	42.63
			誤差(%)	0.00	0.04	-0.03	0.04	-0.03
		$\sigma_r$	計算値(MPa)	-4.65	-9.70	0.22	-9.77	-0.17
			理論値(MPa)	-4.74	-9.73	0.25	-10.00	0.00
			誤差(%)	-1.83	-0.27	-12.74	-2.30	--
球殻頂上部 <E-3>	25	$\sigma_t$	計算値(MPa)	42.80	45.11	40.50	45.16	40.74
			理論値(MPa)	42.63	45.08	40.10	45.35	40.35
			誤差(%)	0.40	0.08	1.00	-0.42	0.97
		$\sigma_l$	計算値(MPa)	42.81	45.12	40.49	45.21	40.71
			理論値(MPa)	42.63	45.08	40.10	45.35	40.35
			誤差(%)	0.42	0.10	0.97	-0.31	0.89
		$\sigma_r$	計算値(MPa)	-4.66	-9.63	0.32	-9.81	-0.13
			理論値(MPa)	-4.65	-9.71	0.24	-10.00	0.00
			誤差(%)	0.23	-0.83	34.73	-1.90	--

注) 青枠内は比較的誤差が大きい項目

赤枠内は最も誤差が大きい項目



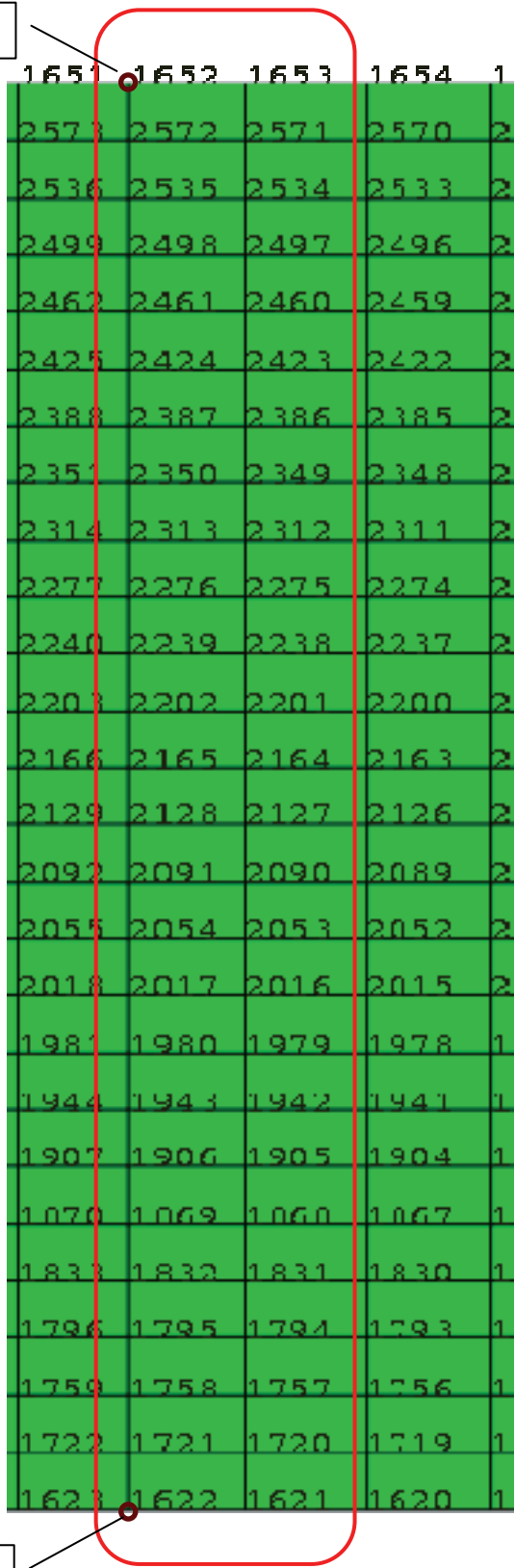
a) 解析モデル



b) A 部の拡大図

図 5.1 検証解析モデル

応力評価線 3 の定義開始節点



応力評価線 3 の定義終了節点

図 5.2 検証解析モデルの応力評価線 3 近傍の節点

## 6. 結論

安全審査に資するため、機器応力評価コード SERENA に応力分類及び応力評価に係る機能改良及び機能追加を行った。

平成 20 年度では、主に以下の 2 項目を実施した。

- ① 応力分類プログラムでは、応力評価線の自動設定方法として、内面側節点グループと外面側節点グループを定義するのみで、評価対象領域における評定応力種類に基づいた代表応力評価線を選定できる機能を追加した。さらに、3次元応力分類方法として、解析結果ファイルのデータ読み込みを改良し、計算時間を大幅に短縮化した。
- ② 応力評価プログラムでは、ファイル指定ダイアログボックスの表示欄を拡張するとともに、計算のプロセスをモニターする機能を追加した。

平成 22 年度では、主に以下の 3 項目を実施した。

- ① 開発環境の維持のためにコードの記述言語を MS-VB6 から、VB2008 へ更新した。
- ② 応力分類機能に計算のプロセスモニターを機能追加する。応力評価機能に対し、入力ファイルダイアログの表示欄拡張を行った。
- ③ JEAC4601-2008 に基づくスカート支持たて置円筒形容器の耐震強度評価方法を追加した。

また、これらの整備に伴い、ユーザーズマニュアル及びプログラムマニュアルを改訂したが本年度迄の整備により、来年度以降の実施すべき項目としては、以下の 2 項目である。

- (1) スカート支持たて置円筒形容器以外の 4 種類の代表的な容器について JEAC4601-2008 に基づく耐震強度評価方法を機能追加する。
- (2) 応力評価プログラム内の疲労評価において、ASME Sec.Ⅲ NB3216.2 に基づく主応力の方向が変化する場合の疲労評価方法を機能追加する。

SERENA コードは、平成 23 年度以降の原子力発電設備等の機器に係わるトラブル解析及びクロスチェック解析において活用する予定である。



## 参考文献

- (1) 通商産業省 資源エネルギー庁 公益事業部原子力発電安全管理課編、「解説原子力設備の技術基準」、電力新報社(1994年)
- (2) 電気技術基準調査委員会編、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」、社団法人日本電気協会(1987)
- (3) 財団法人 原子力発電技術機構 原子力安全解析所、「平成10年度 機器応力評価コード SERENA の保守に関する報告書」、INS/M98-47、平成11年3月
- (4) 財団法人 原子力発電技術機構 原子力安全解析所、「平成14年度 機器応力解析評価支援システムの整備に関する報告書」、M02-48、平成15年3月
- (5) 独立行政法人 原子力安全基盤機構、「平成15年度 機器応力解析評価支援システムの整備」、JNES/SAE04-005、平成16年7月
- (6) 独立行政法人 原子力安全基盤機構、「機器応力解析評価支援システムの整備(平成16年度)」、JNES/SAE05-014、平成17年9月
- (7) 独立行政法人 原子力安全基盤機構、「機器応力評価コード SERENA の改良(平成16年度)」、JNES/SAE05-006、平成17年7月
- (8) 独立行政法人 原子力安全基盤機構、「機器応力解析評価支援システムの改良及び機能追加(平成18年度)」、JNES/SAE07-012、平成19年6月
- (9) 電気技術規程原子力編、「原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2008」、社団法人日本電気協会(平成21年)
- (10) ANSYS, Inc. Theory Manual. 001369. Twelfth Edition.
- (11) NASA SP-8007, BUCKLING OF THIN-WALLED CIRCULAR CYLINDERS, 1968.

