

3 次元炉心群振動解析評価手法について

令和元年 10 月 17 日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. はじめに

本資料は、廃止措置段階の燃料体取出し作業において実施する模擬燃料体の部分装荷時の影響評価のうち、地震時に対する構造健全性評価に適用した 3 次元炉心群振動解析評価手法について補足説明するものである。

2. 適用した 3 次元炉心群振動解析評価手法について

一般に、高速炉の炉心は、多数の炉心構成要素が稠密六角配置にて炉心支持板に差し込まれて自立するように構成され、かつ、運転時と停止時等の温度差により発生する炉心構成要素等の熱膨張の拘束を避けるために、上下方向に炉心構成要素を支持しない構造である。このため、地震時には炉心構成要素は、地震力により炉心構成要素間及び炉心支持構造物と衝突・摩擦しながら水平方向に変位し、上下方向には跳び上がり・落下する 3 次元挙動を示す。また、炉心構成要素は流体中に設置されるため、流体を介して隣接する炉心構成要素の挙動の影響を受ける。

一方で、高速炉の炉心、炉心構成要素、炉心支持構造物設計を行うには、地震時における炉心群振動挙動を把握する必要があるため、群体系における衝突・摩擦、及び流体-構造連成を考慮した耐震解析手法が必要となる。

前述の構造や影響を考慮し、高速炉炉心を対象とした 3 次元炉心群振動挙動を評価可能な解析コードが、高速実証炉開発において開発されていることから、本評価において適用した。別紙 1 に適用した解析コードの概要を、別紙 2 に適用した 3 次元群振動解析評価手法の検証及び妥当性確認結果を、別紙 3 に部分装荷時における検証及び妥当性確認結果を示す。

3. 評価手法のもんじゅ炉心体系への適用性

本解析コードは、一般性のある理論モデルに基づき構築されたコードであり、高速炉炉心に汎用的に適用可能なコードである。解析コードの開発に当たって実施した試験では、炉心構成要素数 1000 体規模の実機解析に対する適用性を確認するため、Step by Step による検証を実施した。別紙 4 に、実機炉心体系への適用性について具体的に示す。

以上より、部分装荷時を含めもんじゅの炉心体系に対して本解析コードを用いた評価手法を適用したことは、もんじゅの炉心体系と前述の試験体系との間で発生事象が異なる条件は無く、解析結果も妥当である。

注：本資料に記載の内容には、経済産業省からの受託事業である「発電用新型炉等技術開発」、「高速炉等技術開発」及び「高速炉国際協力等技術開発」の一環として実施した成果を含む。

以上

別紙 1 3次元炉心群振動解析コードの概要

コード名	REVIAN-3D
項目	
開発機関	三菱重工業株式会社
開発時期	2009年
使用したバージョン	Ver. 8.0
使用目的	地震応答解析
コードの概要	<p>高速炉炉心を対象とした水平方向の炉心構成要素の挙動及び跳び上がり挙動といった3次元炉心群振動挙動を評価するために作成されたコードである。</p> <p>各炉心構成要素は質点系モデルにより構成され、時々刻々の運動方程式をモーダル解析の手法を取り入れた時刻歴応答解析により、炉心構成要素の時刻歴挙動を求めるものである。</p> <p>隣接炉心構成要素との衝突・摩擦や、作用する流体効果は、運動方程式の外力項に入力することで考慮可能である。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、高速炉であるもんじゅ炉心の地震時の3次元群振動解析に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本コードの検証の内容は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発時に想定された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>高速炉であるもんじゅ炉心の地震時の3次元群振動解析に使用していることは、次の通り妥当である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・一般性のある理論モデルに基づき構築されたコードである。また、経済産業省からの受託事業である「発電用新型炉等技術開発」、「高速炉等技術開発」及び「高速炉国際協力等技術開発」の一環として実施した成果である、高速炉の炉心構成要素を模擬した試験体を用い、水平方向及び上下方向の加振力を入力とした単体振動試験、複数体（列及び群）振動試験、多数体振動試験のそれぞれの結果と本解析コードによる結果との比較を行い、衝突力、水平変位応答、跳び上がり挙動が適切に模擬できていることを確認している。また、これらの検証結果は、日本機械学会の査読論文や米国機械学会(ASME)主催のPressure Vessels & Piping Conference（査読有）、日本原子力学会大会において公開している。 ・今回の申請で行った地震応答解析の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。

3 次元炉心群振動解析評価手法の検証及び妥当性確認

(改正 1)

本資料に記載の内容には、経済産業省からの受託事業である「発電用新型炉等技術開発」、
「高速炉等技術開発」及び「高速炉国際協力等技術開発」の一環として実施した成果を含む。

目 次

1. 一般事項.....	3
2. 本解析コードの特徴.....	3
3. 解析手法.....	4
3.1. 解析モデル.....	4
3.2. 運動方程式.....	5
3.3. 衝突荷重・摩擦力.....	7
3.4. 流体力.....	8
4. 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation).....	10
4.1. 試験体.....	10
4.1.1. 実寸大試験装置.....	10
4.1.2. 縮尺 37 体群体系試験装置.....	12
4.1.3. 縮尺 32 体・18 体列体系試験装置.....	13
4.1.4. 縮尺 313 体多数体系試験装置.....	14
4.2. 衝突挙動の検証.....	15
4.2.1. 縮尺 37 体群体系.....	15
4.2.2. 縮尺 32 体・18 対列体系.....	19
4.3. 水平変位応答の検証.....	21
4.3.1. 縮尺 32 体・18 体列体系.....	21
4.3.2. 縮尺 313 体多数体系.....	23
4.4. 上下変位応答(跳び上がり挙動)の検証.....	25
4.4.1. 実寸大単体.....	25
4.4.2. 縮尺 37 体群体系.....	28
4.5. まとめ.....	31
5. 参考文献.....	32

1. 一般事項

本資料は高速炉炉心を対象とした 3 次元炉心群振動解析コード REVIAN-3D (CoRe Element Vibration Analysis Code-3 Dimension) の概要を説明したものである。

高速炉の炉心、炉心構成要素、炉心支持構造物設計を行うには、地震時における炉心群振動挙動を把握する必要があるため、群体系における衝突・摩擦、及び流体構造連成を考慮した耐震解析手法が必要である。本解析コードは、炉心を対象とした水平 2 方向及び鉛直方向の 3 次元炉心群振動挙動を評価するものであり、耐震安全性・信頼性の向上に用いられる。

2. 本解析コードの特徴

高速炉の炉心は多数の燃料集合体等の炉心構成要素で構成されており、地震時には、炉心構成要素は地震力により炉心構成要素間及び炉心支持構造物と衝突、摩擦しながら水平方向に変位し、上下方向に跳び上がり、落下する 3 次元挙動を示す。また、炉心構成要素は流体中に密に設置されるため、流体を介して隣接する炉心構成要素の振動の影響を受ける。本解析コードでは、このような多数の炉心構成要素に衝突や流体力が作用する複雑な 3 次元群振動挙動を解析対象としており、拘束モード法を適用したモーダル解析を行う。

3. 解析手法

3.1. 解析モデル

解析モデルは、炉心構成要素と炉心支持板から構成されており、炉心構成要素に作用する外力(衝突荷重・流体力)は図 3.1 にまとめた通りである。炉心構成要素の群振動解析モデルの考え方を以下に示す。

- ・ 衝突は、上部パッド、中間部パッド、エントランスノズル上部、エントランスノズル下部、球面座、炉心構成要素頂部－UIS 間において考慮する。(図 3.1 の①, ②, ③, ⑧)
- ・ 流体力は、流路網理論によって規定される流体力、エントランスノズル下部のダッシュポット効果によって発生する上下方向の荷重、上下方向流体慣性力、冷却材の流れによる流体力を考慮する。(図 3.1 の④～⑦)
- ・ 炉心構成要素によっては炉心支持板との間にラッチスプリングを設置する構造もあり、ラッチスプリングによる機械的な跳び上がり抑制機構(図 3.1 の⑨)についても解析上考慮できる。
- ・ 設計地震レベル増大に対応可能とするため、パッド外れ、ノズル嵌合部外れ、ノズル嵌合部外れによるダッシュポット効果の低減等を考慮可能とする。
- ・ 炉心構成要素は下端部 2 箇所支持された片持ち梁モデルとして模擬し、モーダル解析によって運動方程式の計算を行う。なお、炉心構成要素の振動モードはエントランスノズル上部・下部でピン支持の境界条件とした振動モードとする。
- ・ 炉心支持板は上下方向の面外 1 次振動モードを考慮して算出する。(図 3.2)
- ・ 流体中における炉心構成要素はその内部流体と一緒に動かし、炉心構成要素の質量には内部流体も含める(モード質量・振動モード・固有振動数・全体質量・慣性モーメントなどに反映させる)。

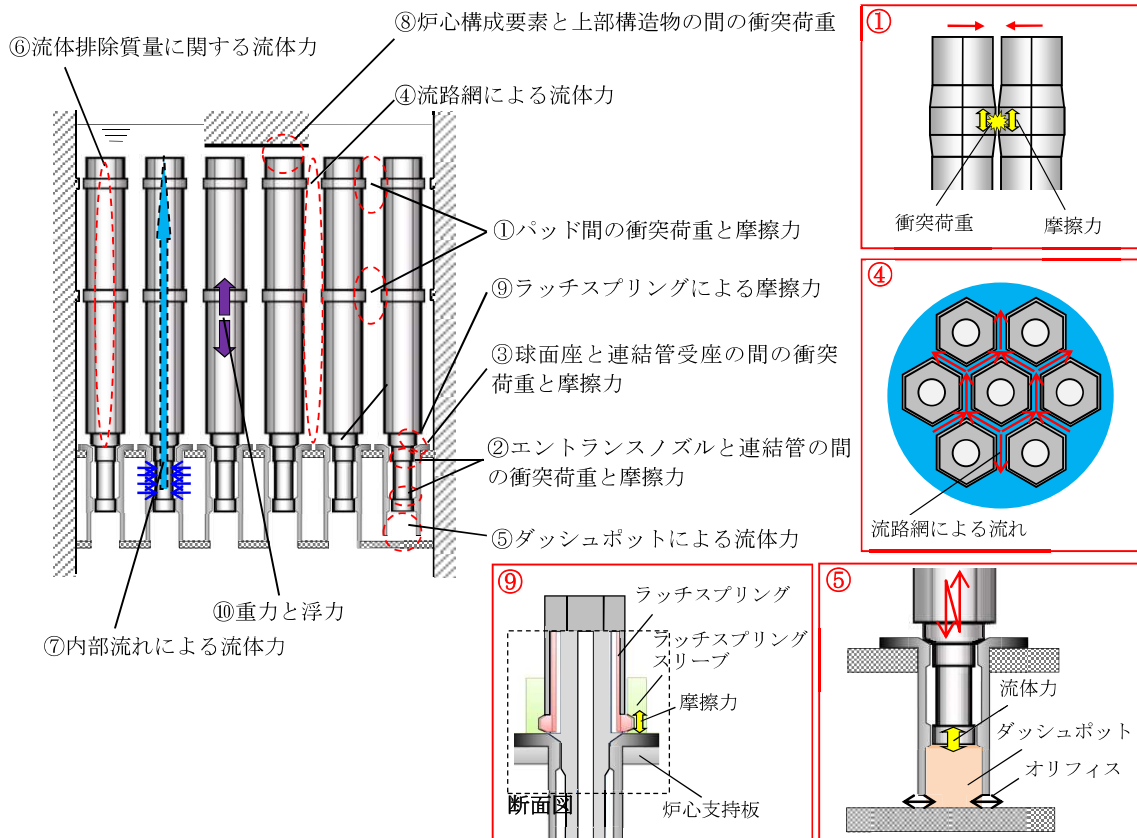


図 3.1 炉心構成要素に作用する外力

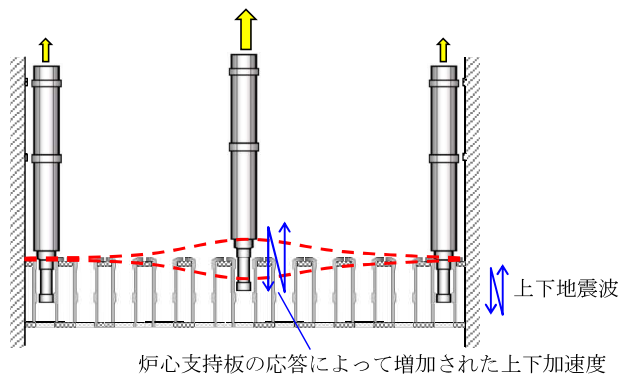


図 3.2 炉心支持板の応答

3.2. 運動方程式

本解析が対象としている炉心構成要素の振動挙動は水平 2 方向における振動と上下の跳び上がりである。炉心構成要素に作用する荷重によって生じる水平方向の応答の考え方を図 3.3 に示す。上下方向の応答は 1 質点系として扱う。

多数の炉心構成要素群体系に対する運動方程式を次式に示す。

$$[M][\ddot{x}] + [C][\dot{x}] + [K][x] = \{F\} \tag{1}$$

1本の炉心構成要素における質量マトリクス[M]を次式に示す。

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{x1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{x1}\beta_{x1} & 0 & m_{x1}\beta''_{x1} & 0 & 0 \\ 0 & m_{x2} & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{x2}\beta_{x2} & 0 & m_{x2}\beta''_{x2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{x3} & 0 & 0 & 0 & m_{x3}\beta_{x3} & 0 & m_{x3}\beta''_{x3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{y1} & 0 & 0 & 0 & m_{y1}\beta_{y1} & 0 & m_{y1}\beta''_{y1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{y2} & 0 & 0 & m_{y2}\beta_{y2} & 0 & m_{y2}\beta''_{y2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{y3} & 0 & m_{y3}\beta_{y3} & 0 & m_{y3}\beta''_{y3} & 0 \\ m_{x1}\beta_{x1} & m_{x2}\beta_{x2} & m_{x3}\beta_{x3} & 0 & 0 & 0 & M_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{y1}\beta_{y1} & m_{y2}\beta_{y2} & m_{y3}\beta_{y3} & 0 & M_y & 0 & 0 & 0 \\ m_{x1}\beta''_{x1} & m_{x2}\beta''_{x2} & m_{x3}\beta''_{x3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{y1}\beta''_{y1} & m_{y2}\beta''_{y2} & m_{y3}\beta''_{y3} & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

m_{xn} , m_{yn} は n 次のモード質量, β_{xn} , β_{yn} は水平動における n 次の刺激係数, β''_{xn} , β''_{yn} は回転動における n 次の刺激係数である。また, M_x , M_y , M_z は炉心構成要素とその内部流体質量を含む質量(基本的には 3 つとも同じ), I_x , I_y は炉心構成要素の内部流体質量を考慮した重心位置における慣性モーメントである。なお, 種類の異なる炉心構成要素がある場合は, それに対応した質量マトリクスで計算する。減衰マトリクス[C]と剛性マトリクス[K]を次式に示す。

$$[C] = 2[M][\zeta][\omega] \quad (3)$$

$$[K] = [\omega][M][\omega] \quad (4)$$

ここで, $[\zeta]$ は減衰比, $[\omega]$ は角固有振動数である。剛体運動(並進・回転)と上下運動には減衰や角固有振動数は不要であり, 0 とする。また, $[x]$, $[\dot{x}]$, $[\ddot{x}]$ は変位, 速度, 加速度マトリクスであり, $\{F\}$ は炉心構成要素に作用する水平方向の外力ベクトルである。

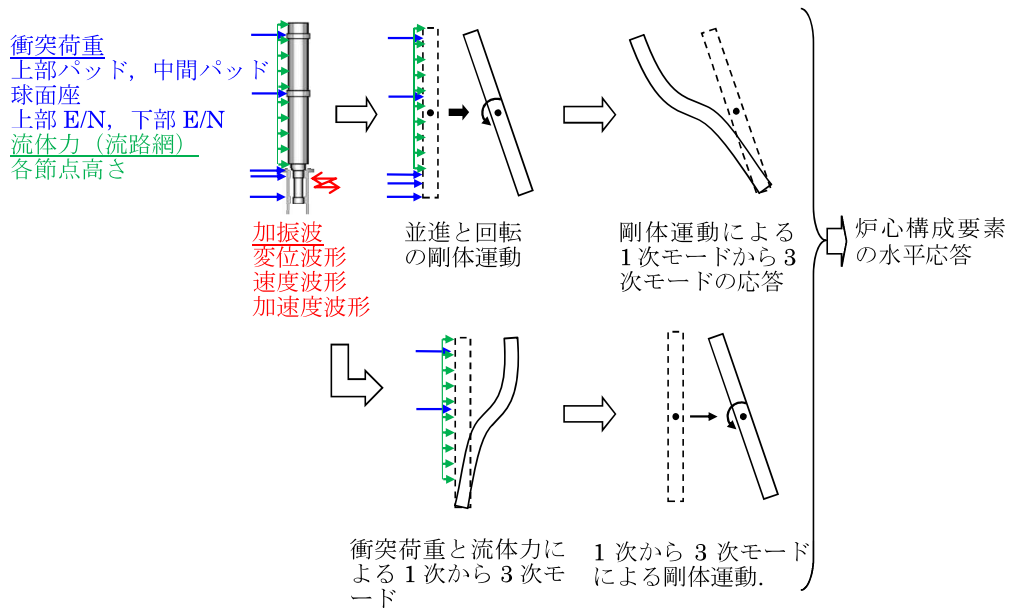


図 3.3 剛体と 1 次から 3 次の振動モードによる水平方向の応答

3.3. 衝突荷重・摩擦力

衝突は、上部パッド、中間部パッド、エントランスノズル上部、エントランスノズル下部、球面座、炉心構成要素頂部－UIS間(図 3.1 の①, ②, ③, ⑧)において考慮している. 図 3.4 に示すように、衝突荷重は、落下試験等で取得した反発挙動から力学的に等価となる衝突剛性と衝突減衰による荷重で置き換える. また、摩擦力は衝突荷重に直交する方向に働き、その大きさは衝突荷重に摩擦係数を乗じたものとする.

球面座と連結管受座との衝突荷重(連結管受座の法線方向)と摩擦力(連結管受座の傾き方向)を図 3.5, パッド間の衝突を図 3.6, エントランスノズルと連結管の衝突を図 3.7 に示す.

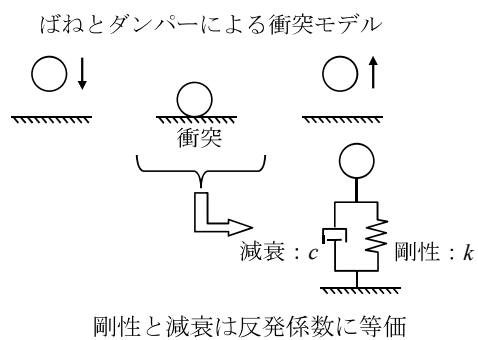


図 3.4 衝突荷重と摩擦力のモデル化

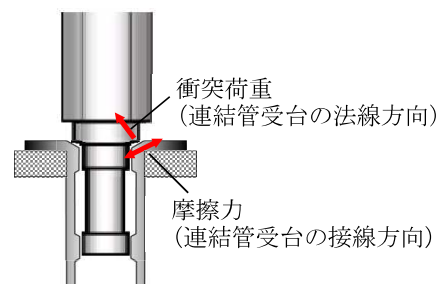


図 3.5 球面座における衝突

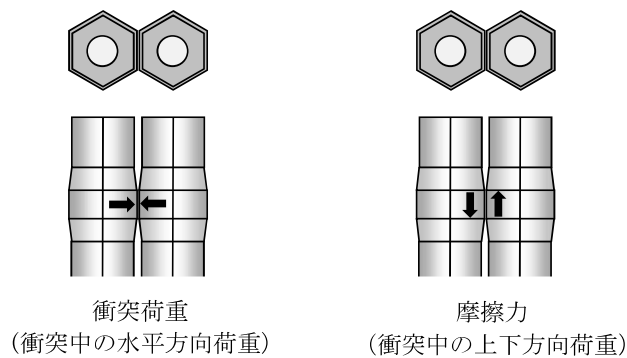


図 3.6 上部パッドと中間パッドの衝突荷重

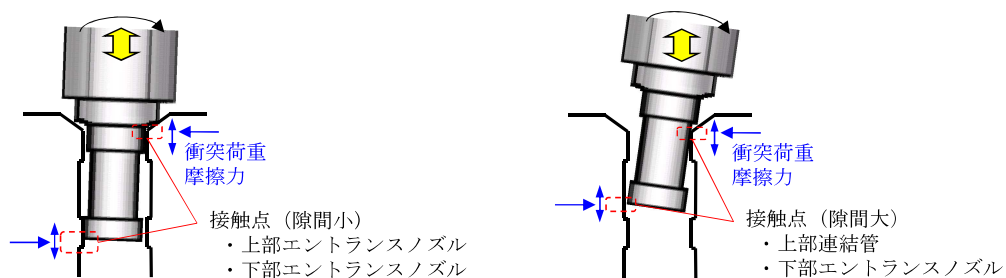


図 3.7 エントランスノズルと連結管の接触状態

3.4. 流体力

流体力は、流路網理論によって規定される流体力、エントランスノズル下部のダッシュポット効果によって発生する上下方向の荷重、上下方向流体慣性力、冷却材の流れによる流体力(図 3.1 の④～⑦)を考慮している。以下に概要を示す。

- ・ 炉心構成要素群振動時には、炉心構成要素間の流路の交点における流量と圧力の釣り合いによる流路網理論に基づいて流体力(流体付加質量)を考慮する[1]。炉心構成要素群モデルの概略を図 3.8 に示す。
- ・ 地震動のように構造物全体を加振する場合には群全体で応答すると考えられ、図 3.9 に示すように炉心槽を外筒、群全体を内筒とする二重円筒における圧力分布に等しいとする。炉心構成要素は高さによって応答加速度が異なるため、炉心構成要素の高さごとに流体力を計算する。
- ・ 炉心構成要素の上下動によって、連結管下部領域にあるドレン用の小さい孔(オリフィス)の流れによる圧損でダッシュポットの効果が生じる(図 3.10)。オリフィス以外にも流路がある場合はそれも考慮して圧損係数の計算に反映させる。
- ・ 上下に振動する炉容器内の炉心構成要素には、図 3.11 に示すように流体排除質量に関する流体力 F_{wmass} が作用するが、これは Fritz [2]の慣性連成項に対応し、流体排除質量 m_w に炉容器の上下加速度 \ddot{Z}_0 を乗じた荷重である。ここでは上下方向流体慣性力と呼ぶ。
- ・ プラント通常運転時には、図 3.12 に示すようにエントランスノズル側面の孔から冷却材が流入し、炉心構成要素内部の下から上に流れる。この冷却材の流れによって炉心構成要素の上下に差圧 P_{dp} が生じ、エントランスノズル下面(面積 A_1)で受圧することで炉心構成要素を浮上させる向きに流体力 $F_{upw} = P_{dp} \cdot A_1$ が発生する。炉心構成要素や炉心支持板の挙動などによらず、流れによる差圧は一定とする。

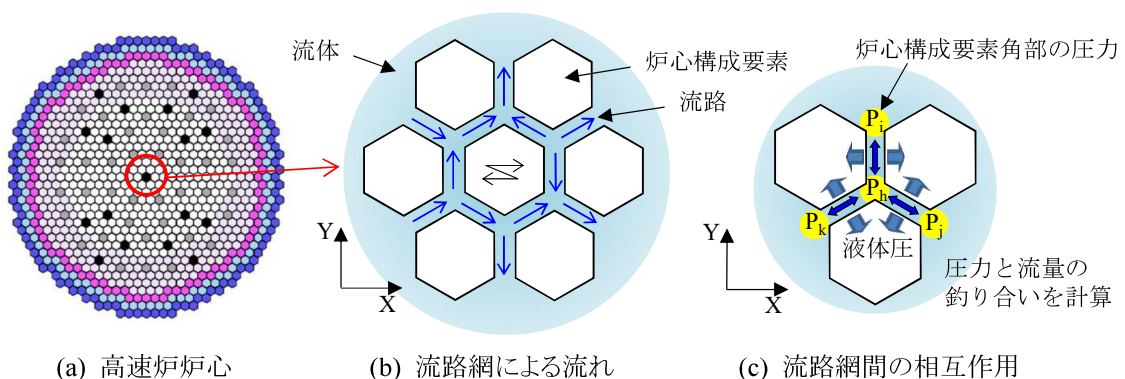


図 3.8 流路網による流体力(流体付加質量)

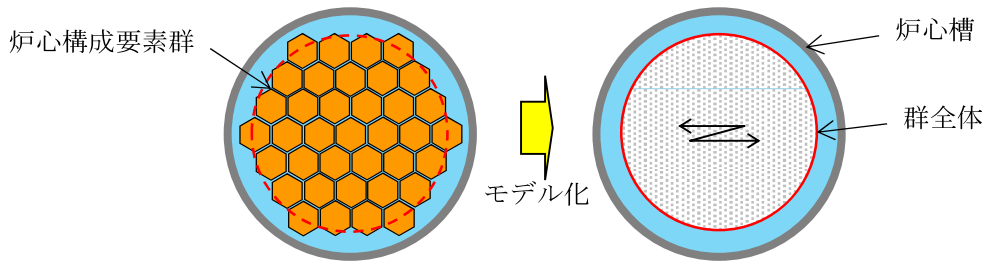


図 3.9 周囲の境界条件

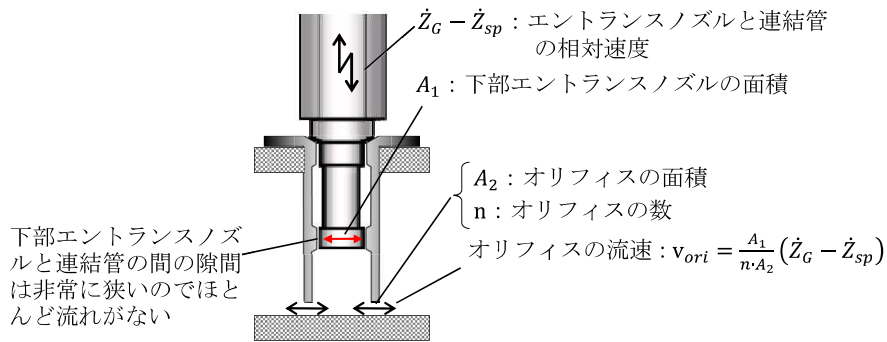


図 3.10 連結管の下部領域のダッシュポットによる流体力

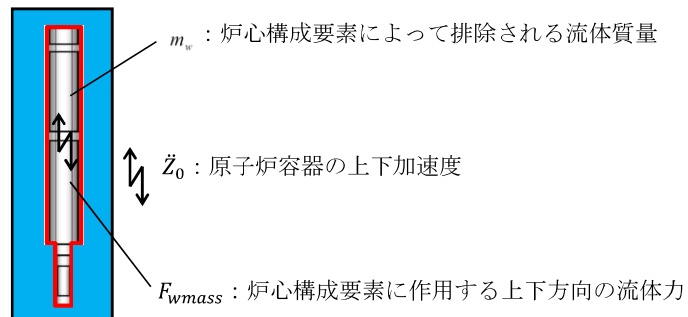


図 3.11 炉心構成要素によって排除された流体質量と上下加速度による流体力

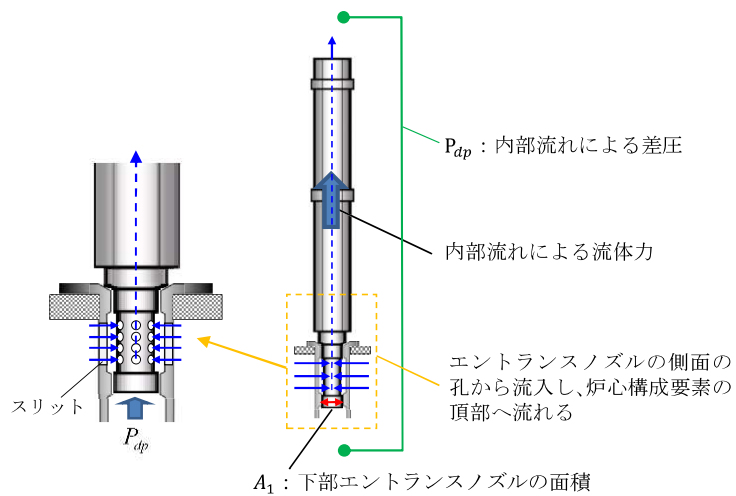


図 3.12 内部流れによる流体力

4. 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

本計算機コードは, 3章に示す一般性のある理論モデルに基づき構築されたオリジナルコードである. そこで, 炉心構成要素を模擬した試験体による加振試験結果と解析結果の比較により, 解析の妥当性を確認した. 以下に, 衝突挙動, 水平変位応答, 上下変位応答(跳び上がり挙動)について検証した結果を示す. なお, 検証結果の一部については参考文献に示す複数の論文にて公開している.

4.1. 試験体

上下変位応答の検証には実寸大試験装置, 衝突挙動の検証には縮尺 32 体・18 体列体系試験装置および縮尺 37 体群体系試験装置, 水平変位応答の検証には縮尺 32 体・18 体列体系試験装置および縮尺 313 体多数体試験装置を用いている. 各試験装置の概要について以下に示す.

4.1.1. 実寸大試験装置

ナトリウム冷却高速炉実用炉(JSFR:Japan Sodium-cooled Fast Reactor)の炉心構成要素(炉心燃料集合体等)の実寸大試験体は, 内部構造物の燃料要素(Fuel pin)や遮蔽体(Shield)の質量分布を模擬して, 炉心構成要素の固有振動数や振動モードに合うように設計した. 架台で支持された試験容器を振動台上に設置し, 試験容器下部に設置した連結管に炉心構成要素を挿入する. 加振中に炉心構成要素の上下差圧を調整できるように試験容器の下部から上部へ水を流すことのできる流動装置を使用した. 試験装置と主な計測点の概要を図 4.1 に示す. また, 燃料集合体を模擬した試験体の概要を図 4.2 に示す.

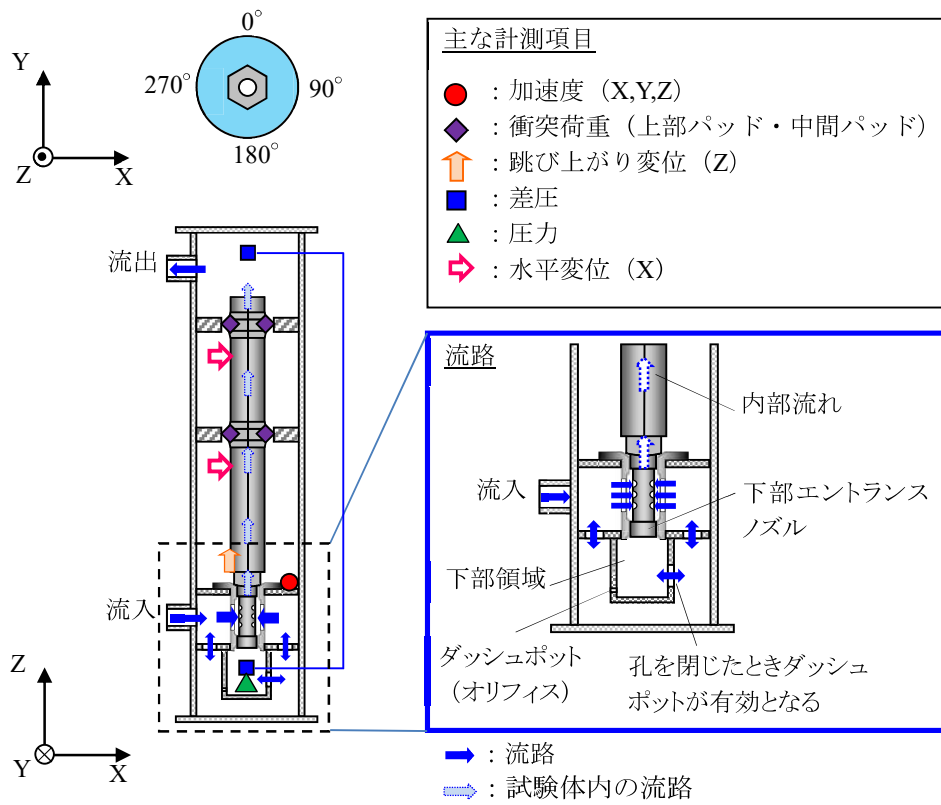


図 4.1 実寸大試験装置

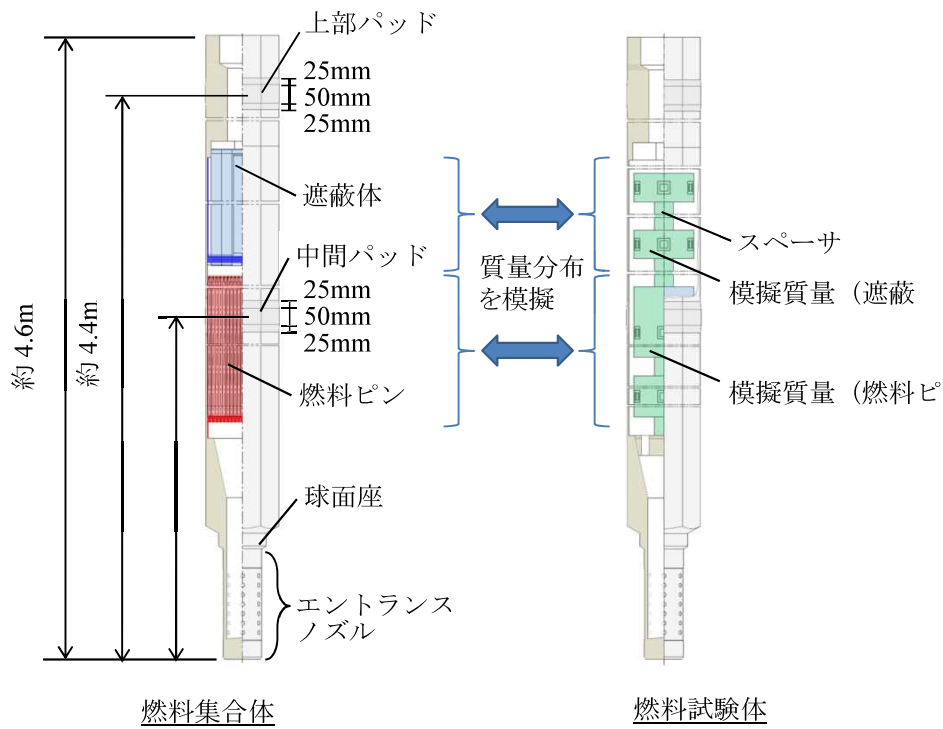


図 4.2 燃料集合体と試験体

4.1.2. 縮尺 37 体群体系試験装置

縮尺 37 体群体系試験では、試験容器下部の炉心支持板に設置された連結管に 37 体の 1/1.5 縮尺試験体を挿入した。試験装置および主な計測点の概要を図 4.3 に示す。重力に対する内部流れによる上向き流体力の影響が実機と同等になる流水中条件(炉心構成要素の上下における圧力差)を調整可能とした。

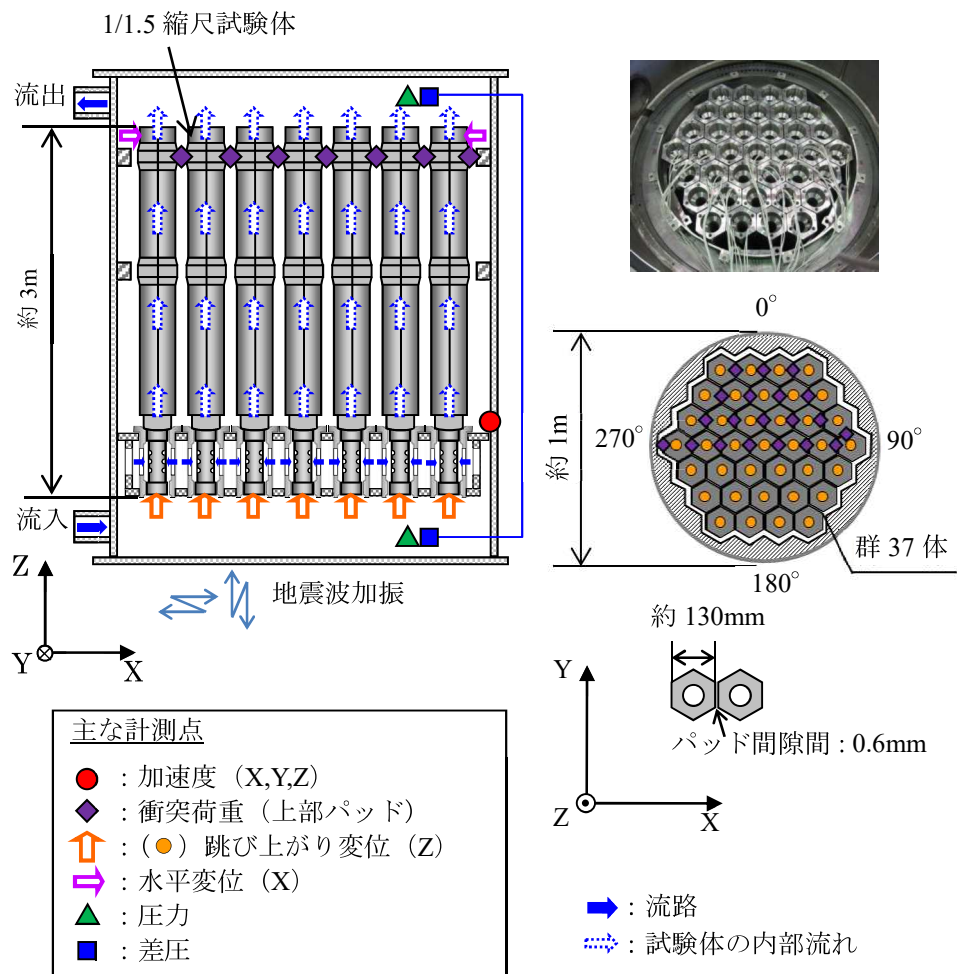


図 4.3 群体系試験体と計測点

4.1.3. 縮尺 32 体・18 体列体系試験装置

縮尺 32 体列体系試験では, 試験容器下部の支持板に設置された連結管に 32 体の 1/1.5 縮尺試験体を挿入した. 試験装置および主な計測点の概要を図 4.3 に示す. 多数体の列体系における水平挙動を確認するための試験であり, 気中条件を対象とした.

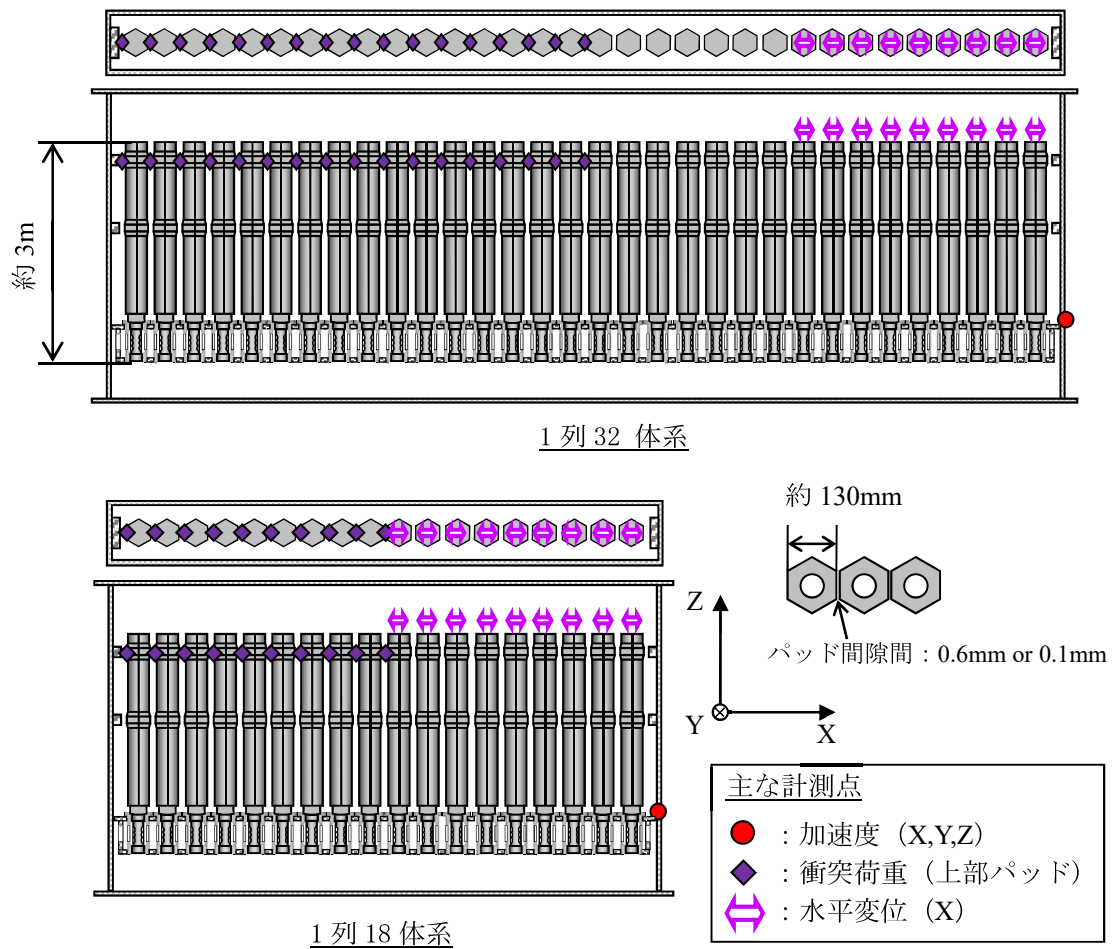


図 4.4 32 体列体系試験体と計測点

4.1.4. 縮尺 313 体多数体系試験装置

313 体多数体系試験は、最長列 19 体で、周囲の炉心構成要素との干渉が生じる群体系である。炉心構成要素の試験体は縮尺比 1/2.5 とし、試験容器下部の炉心支持板に設置された連結管に 313 体の 1/2.5 縮尺試験体を挿入した。試験装置および主な計測点の概要を図 4.5 に示す。炉心支持板端の加速度、試験体頂部水平変位を計測した。

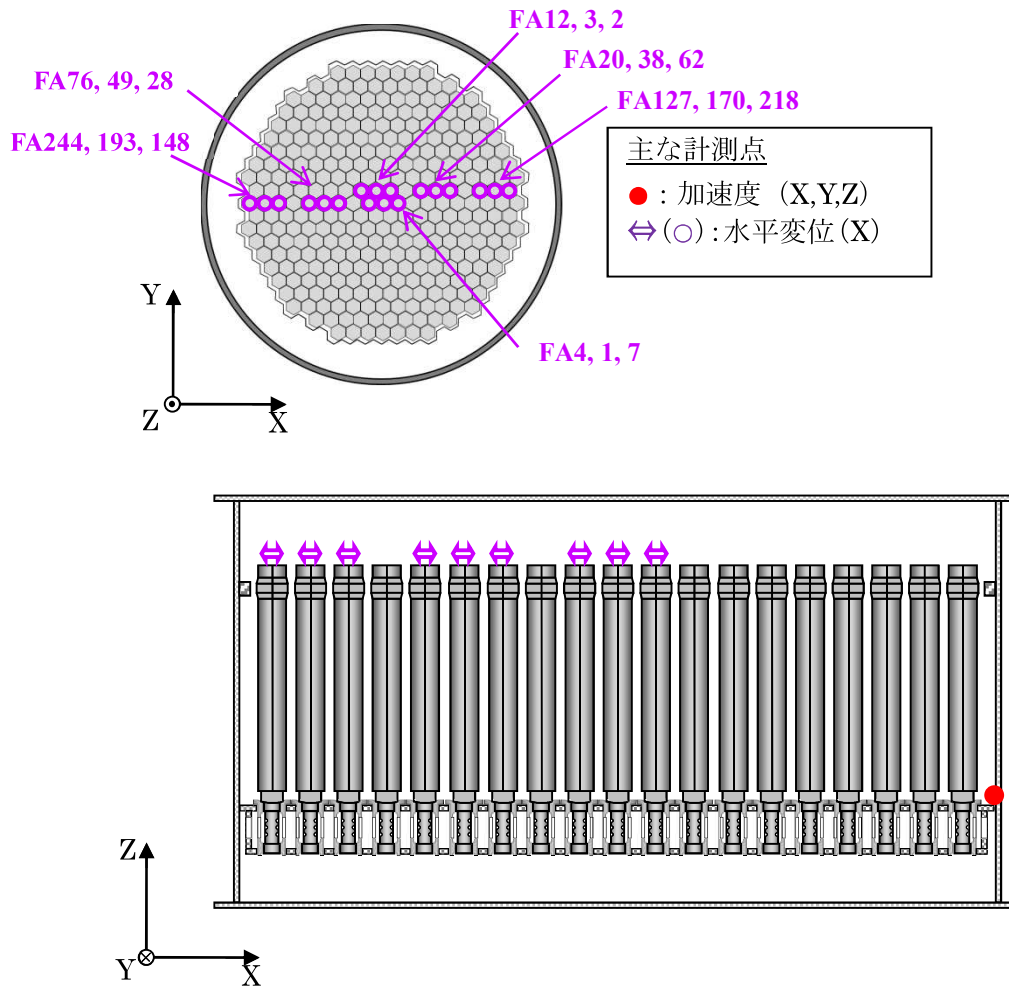


図 4.5 313 体多数体系試験体と計測点

4.2. 衝突挙動の検証

衝突挙動は、縮尺 32 体・18 体列体系と縮尺 37 体群体系の試験装置を用いて検証を行った。

4.2.1. 縮尺 37 体群体系

縮尺 37 体群体系の気中と水中の水平加振において、試験と解析を比較することで、群体系の解析における衝突挙動の妥当性を検証した。加振波は正弦波と地震波にて実施した。試験条件を表 4.1 に示し、上部パッドの衝突荷重の計測位置とその付番を図 4.6 に示す。また、試験で用いた地震波加速度と床応答スペクトルを図 4.7 に示す。

全計測点における最大衝突荷重を試験条件毎に図 4.8 にまとめて示す。気中と水中の雰囲気の違いや、加振波の違いに関わらず、衝突荷重は試験に対して解析が保守側となることがわかる。

また、各計測点に生じた最大衝突荷重を図 4.9 に示す。各試験ケースにおいて試験と解析の衝突箇所に対する衝突荷重の傾向は概ね一致しているが、解析の方が試験より衝突荷重は大きい。解析の衝突荷重が試験より大きい傾向である原因として、下記が挙げられる。

- ・ 試験では試験体が衝突することで軸回りの回転が生じて衝突荷重が低減し得るが、解析では軸回りの回転を無視している
- ・ 解析では図 4.10(a)のように衝突荷重が生じるが、試験では試験体の初期曲がりや据付状態などによって加振方向以外の応答成分が生じ、図 4.10(b)のようにコアフォーマに斜めに当たって衝突荷重が分散する可能性がある。
- ・ 水中条件において、試験では流体付加減衰が生じるが、解析では無視している。

いずれも解析の衝突荷重を保守側に評価することとなるため、群体系の解析手法としては妥当である。

表 4.1 縮尺 37 体群体系 試験条件(衝突挙動の検証)

試験ケース	雰囲気	加振条件	
		方向	加振波
G-h-1	気中	X	正弦波: 3.9m/s ² , 5.1Hz
G-h-2	水中		
G-s-1	気中		地震波(図 4.7)
G-s-2	水中		

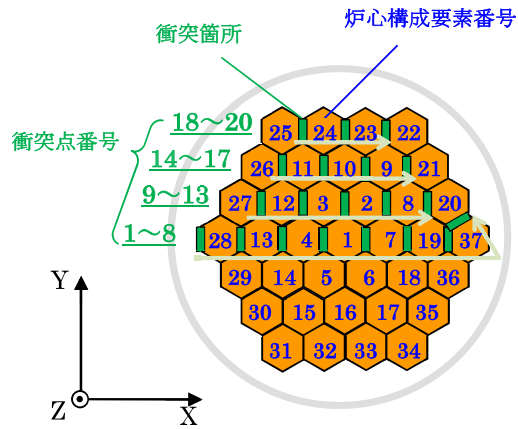


図 4.6 衝突荷重の計測点番号(群体系)

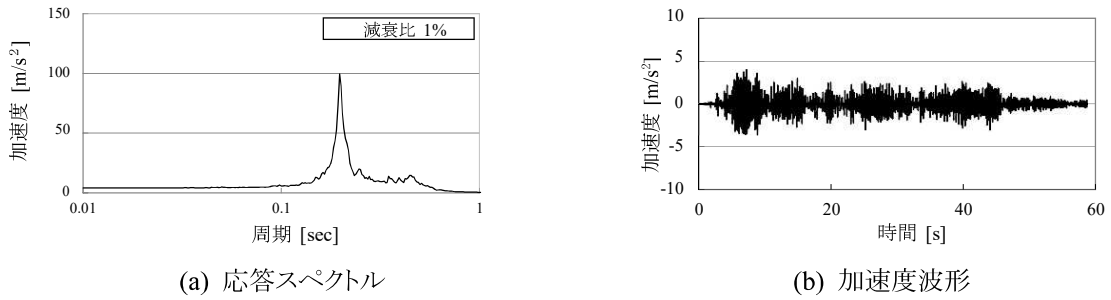


図 4.7 地震波加速度と応答スペクトル(減衰 1%)

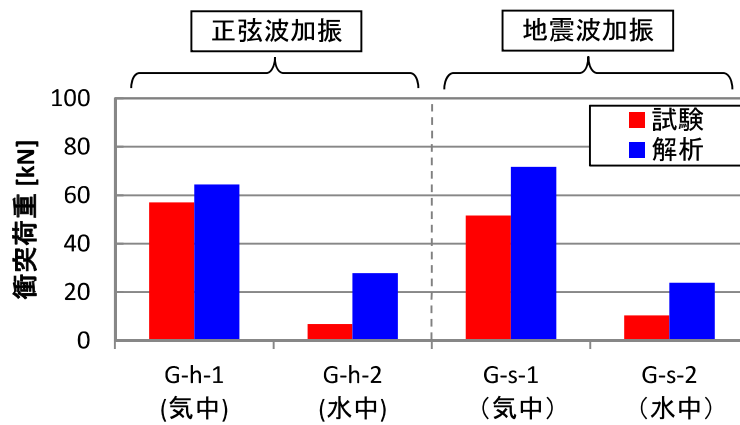
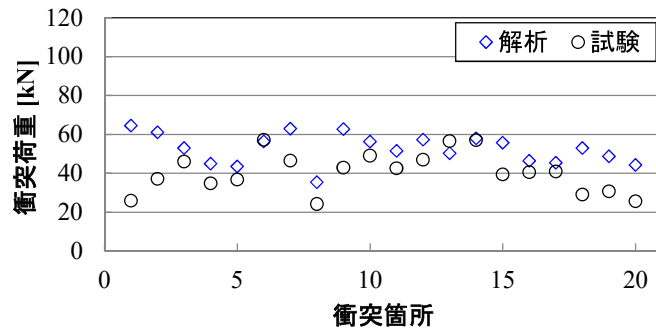
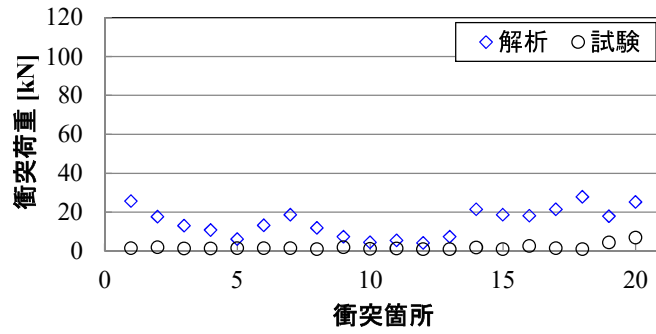


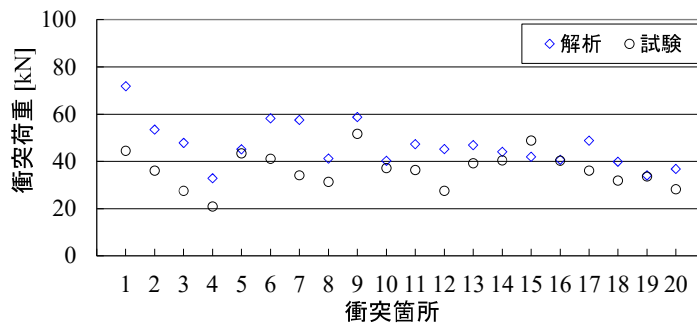
図 4.8 最大衝突荷重まとめ(縮尺 37 体群体系)



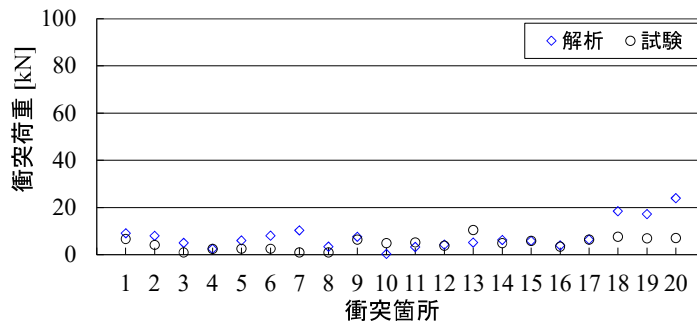
(a) 気中 (G-h-1: 水平单独正弦波加振 X 方向 3.9m/s^2 5.1Hz)



(b) 水中 (G-h-2: 水平单独正弦波加振 X 方向 3.9m/s^2 5.1Hz)

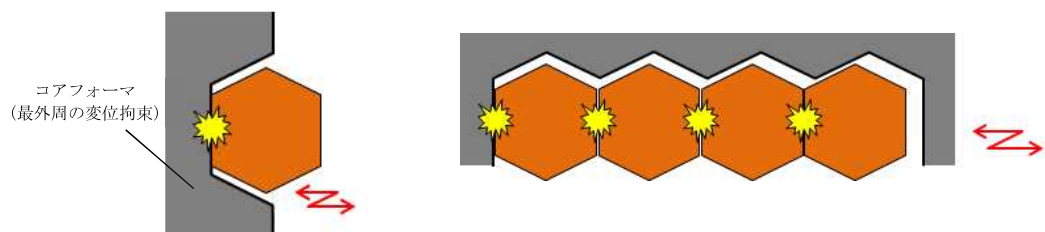


(c) 気中 (G-s-1: 水平单独地震波加振 X 方向)

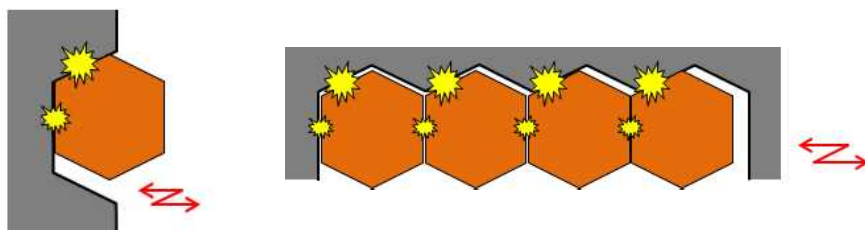


(d) 水中 (G-s-2: 水平单独地震波加振 X 方向)

図 4.9 群体系における衝突荷重



(a) 加振方向のみの振動による衝突



(b) 斜め当たりの衝突

図 4.10 最外周試験体のコアフォームとの干渉

4.2.2. 縮尺 32 体・18 対列体系

縮尺 32 体・18 体列体系の気中の正弦波水平加振において、試験と解析を比較することで、多数体列の解析における衝突挙動の妥当性を検証した。試験条件を表 4.2 に示し、上部パッドの衝突荷重の計測位置とその付番を図 4.11 に示す。

全計測点における最大衝突荷重を試験条件毎に図 4.12 にまとめて示す。最大衝突荷重は全試験ケースにおいて試験と解析でよい一致を示しており、列体系試験体数およびパッド間隙間の差異による最大衝突荷重の傾向を解析で適切に評価できていることがわかる。

また、試験ケース毎に各計測点で生じた最大衝突荷重を図 4.13 に示すが、試験と解析において衝突箇所に対する衝突荷重の傾向は概ね一致しており、解析の方が試験より衝突荷重は大きい。解析の衝突荷重が試験より大きい傾向である原因として、下記が挙げられる。

- ・ 試験では試験体が衝突することで軸回りの回転が生じて衝突荷重が低減し得るが、解析では軸回りの回転を無視している。
- ・ 多数体列であるため、試験では衝突するタイミングにばらつきを持つ。

いずれも解析の衝突荷重を保守側に評価することとなるため、多数体の列における解析手法としては妥当である。

表 4.2 縮尺 32 体・18 体列体系 試験条件 (衝突挙動の検証)

試験ケース	雰囲気	体数	加振波 (正弦波)			パッド間隙間
			方向	レベル	振動数	
R-h-1	気中	18 体	X	3.9m/s ²	5.1Hz	0.1
R-h-2	気中	18 体				0.6
R-h-3	気中	32 体				0.6

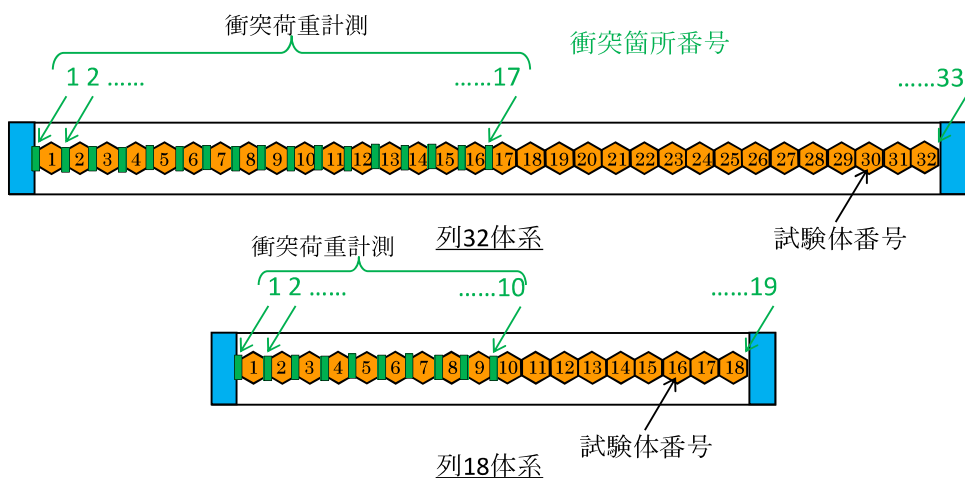


図 4.11 衝突荷重の計測点番号 (列体系)

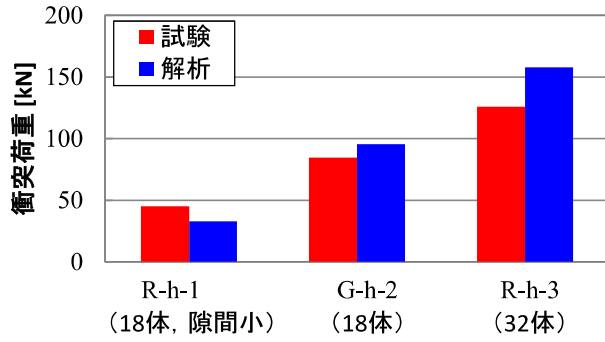
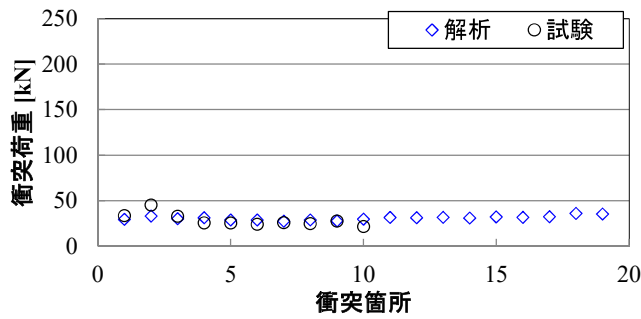
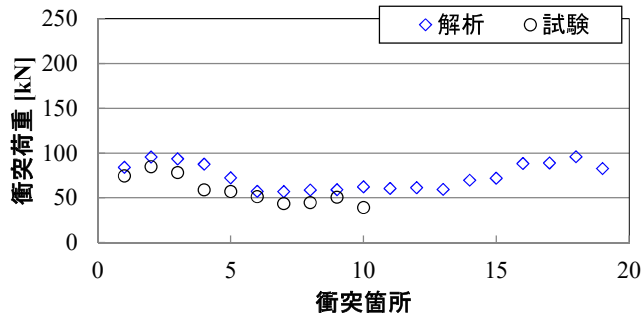


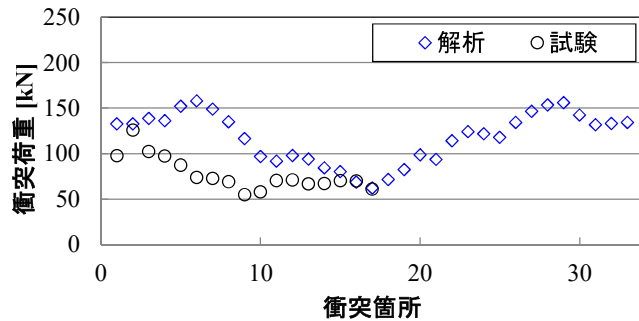
図 4.12 最大衝突荷重まとめ(縮尺 32 体・18 体列体系)



(a) 気中(R-h-1:水平単独正弦波加振 X 方向 3.9m/s^2 5.1Hz 18 体列体系 パッド間隙間 0.1mm)



(b) 気中(R-h-2:水平単独正弦波加振 X 方向 3.9m/s^2 5.1Hz 18 体列体系 パッド間隙間 0.6mm)



(c) 気中(R-h-3:水平単独正弦波加振 X 方向 3.9m/s^2 5.1Hz 32 体列体系 パッド間隙間 0.6mm)

図 4.13 列体系における衝突荷重

4.3. 水平変位応答の検証

水平変位応答について、縮尺 32 体・18 体列体系と縮尺 313 体多数体系の試験装置を用いて検証を行った。

4.3.1. 縮尺 32 体・18 体列体系

縮尺 32 体・18 体列体系の気中の正弦波水平加振において、試験と解析を比較することで、多数体列の解析における水平変位応答の妥当性を検証した。試験条件を表 4.2 に示し、上部パッドの衝突荷重の計測位置とその付番を図 4.14 に示す。

最大水平変位を試験条件毎に図 4.15 にまとめて示す。最大水平変位は全試験ケースにおいて試験と解析でよい一致を示しており、列体系試験体数およびパッド間隙間の差異による最大水平変位の傾向を解析で適切に評価できていることがわかる。

また、試験ケース毎に各計測点で生じた最大水平変位を図 4.16 に示すが、試験と解析において計測位置に対する水平変位の傾向は概ね一致しており、多数体の列における解析手法としては妥当である。

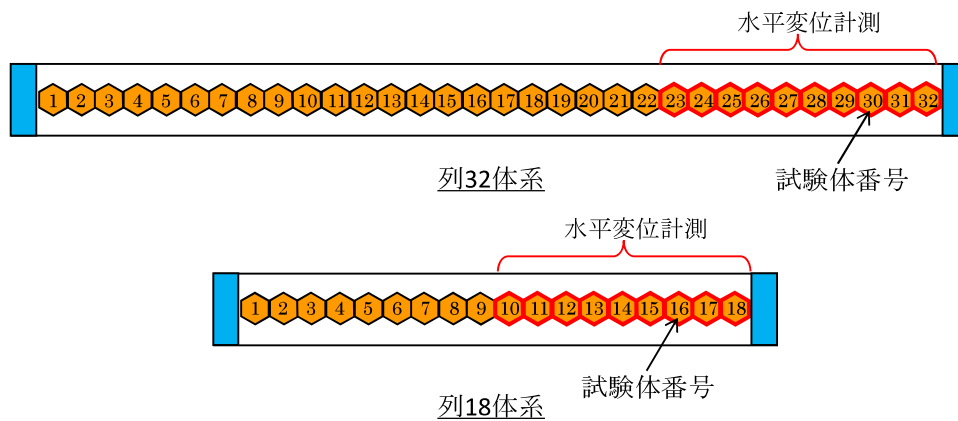


図 4.14 水平変位の計測点番号(列体系)

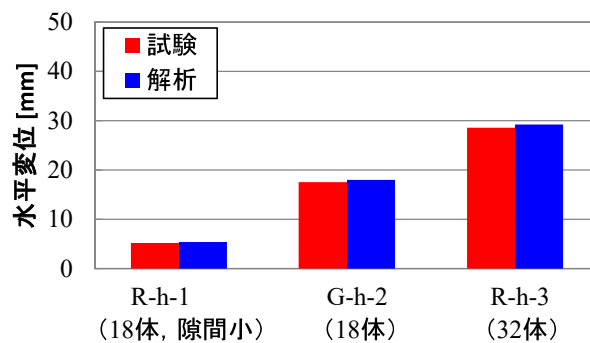
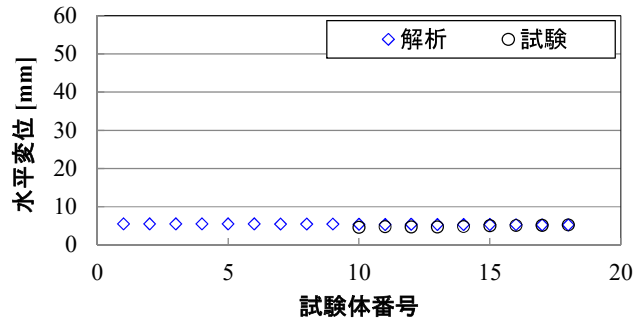
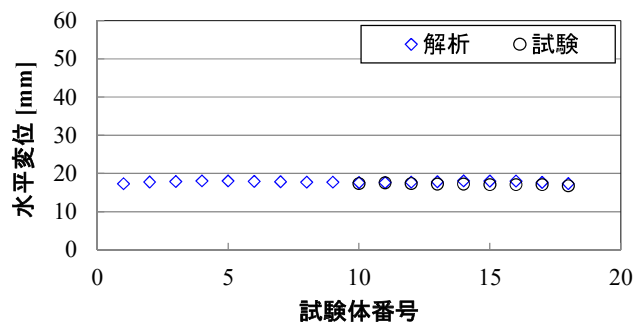


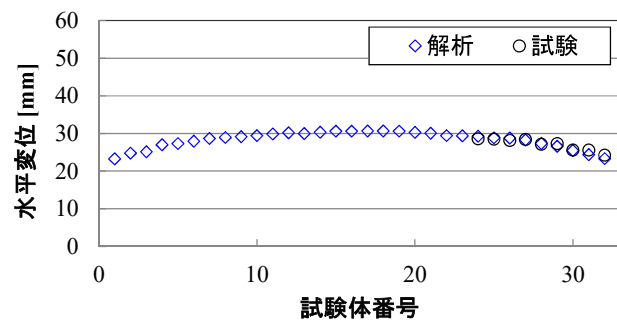
図 4.15 最大水平変位まとめ(縮尺 32 体・18 体列体系)



(a) 気中 (R-h-1: 水平単独正弦波加振 X 方向 3.9m/s^2 5.1Hz 18 体列体系 パッド間隙間 0.1mm)



(b) 気中 (R-h-2: 水平単独正弦波加振 X 方向 3.9m/s^2 5.1Hz 18 体列体系 パッド間隙間 0.6mm)



(c) 気中 (R-h-3: 水平単独正弦波加振 X 方向 3.9m/s^2 5.1Hz 32 体列体系 パッド間隙間 0.6mm)

図 4.16 列体系における水平変位

4.3.2. 縮尺 313 体多数体系

313 体多数体系の水中条件での地震波水平加振において、試験と解析を比較することで解析における水平応答の妥当性を検証した。試験条件を表 4.3 に示す。また、試験で用いた地震波加速度と床応答スペクトルを図 4.17 に示す。

多数体群の外周側の層から試験体 FA244, 193, 148, 中間層から試験体 FA76, 49, 28, 中央側の層から試験体 FA4, 1, 7 における(図 4.5 参照), 試験と解析の頂部水平変位の時刻歴波形を図 4.18 に示す。多数体群のいずれの層においても、試験と解析の頂部水平変位の傾向が良く一致していることが確認できた。また、水平変位計測点(図 4.5 参照)における試験と解析の頂部水平両振幅変位の最大値を図 4.19 に示す。多数体群の中央に近いほど水平両振幅変位は大きく、端になるほど水平両振幅変位は小さくなっており、試験と解析は近い傾向を示している。

以上より、多数体系における水平変位応答が解析で妥当に評価できることを確認した。

表 4.3 313 体多数体系試験体 試験条件(水平変位応答の検証)

試験ケース	試験体数	雰囲気	加振条件	
			方向	加振波
M-h-1	313	水中	X	地震波(図 4.17)

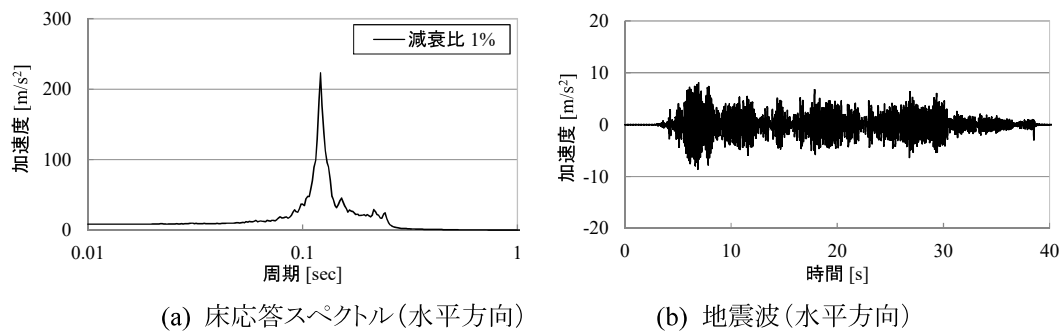
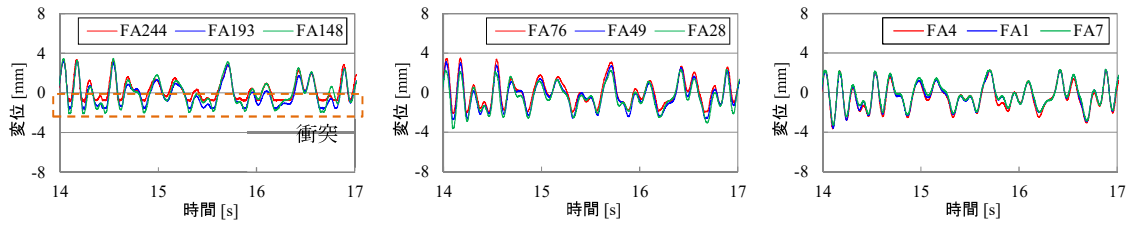
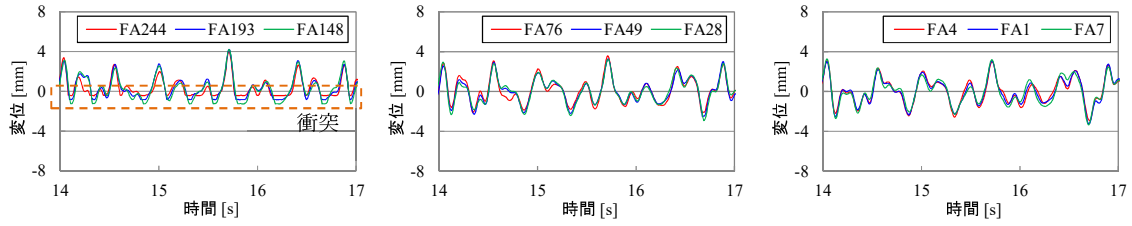


図 4.17 地震波加速度と床応答スペクトル(減衰比 1%)



(a) 試験結果



(b) 解析結果

図 4.18 多数体系試験における試験と解析の頂部水平変位 (M-h-1: 水平単独地震波加振)

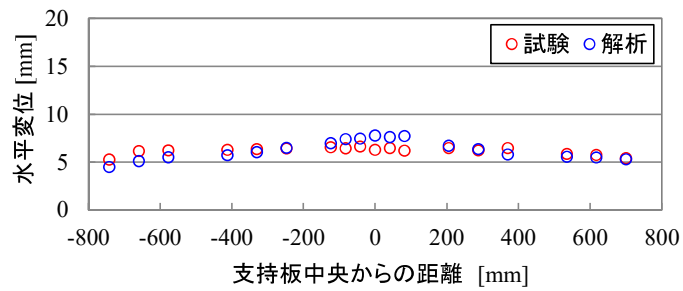


図 4.19 試験と解析の最大水平両振幅変位 (M-h-1: 水平単独地震波加振)

4.4. 上下変位応答(跳び上がり挙動)の検証

上下変位応答について、実寸大単体と縮尺 37 体群体系の試験装置を用いて検証を行った。

4.4.1. 実寸大単体

実寸大単体の正弦波加振において、上下変位応答(跳び上がり挙動)を試験と解析で比較することで、解析の妥当性を検証する。加振試験の試験条件を表 4.4 に示す。U-v-1 と U-v-2 は気中と流水中の雰囲気の違い、U-hv-1 と U-hv-2 は水平応答が及ぼす影響、U-v-3 は長周期波への適用を評価するために実施している。

最大跳び上がり変位を試験条件毎に図 4.20 に示す。最大跳び上がり変位は全試験ケースにおいて試験と解析でよい一致を示しており、気中と流水中の雰囲気の違いと、水平応答による摩擦力の有無および長周期波の有無が、跳び上がり変位に及ぼす影響を解析で適切に評価できていることがわかる。

以下に各試験ケースの時刻歴応答結果について記す。気中および流水中の正弦波上下加振の跳び上がり変位を図 4.21 および図 4.22 に示す。跳び上がりのタイミングによって変位波形は一致しないが、気中で約 20mm、流水中で約 30mm の跳び上がり変位は試験と解析で近い傾向を示した。次に、気中および流水中の正弦波水平+上下加振における跳び上がり変位を図 4.23 および図 4.24 に示す。水平加振が加わることで気中では跳び上がりがほとんど生じなくなり、流水中では約 15mm に低減し、跳び上がり変位の波形は試験と解析で近い傾向を示した。これは、上下加振に水平加振が加わることで、炉心構成要素の水平応答で生じるエントランスノズルの摩擦力が跳び上がり変位を抑制したためと考えられる。

次に、上下単独加振において、長周期波を含むケース(U-v-3: 14.7m/s^2 11.9Hz に 1.48m/s^2 1.0Hz を重畳させた上下正弦波加振)の跳び上がり変位を示す。これは、解析が上下の長周期地震動に対応していることを検証するものである。図 4.25 に長周期波を含む U-v-3 の結果を示すが、支持板の変位約 40mm に対して試験体の跳び上がりによる上下絶対変位は約 60mm であり、応答波形からも支持板と試験体の間の相対変位(跳び上がり変位)が支持板の変位に大きく影響を受けていることが確認できる。一方、長打周期波がない U-v-2(図 4.22)の応答波形は、支持板と試験体で振幅や周波数成分が大きく異なっている。以上より、長周期波が跳び上がり変位へ及ぼす影響を本解析手法で模擬できており、長周期地震動による大振幅に対応可能である。

表 4.4 実寸大単体 試験条件(跳び上がり挙動の検証)

試験ケース	雰囲気	加振波(正弦波)		
		方向	レベル	振動数
U-v-1	気中	Z	14.7m/s ²	11.9Hz
U-v-2	流水中 (上下差圧 0.3MPa)			
U-hv-1	気中	X+Z	X : 3.9m/s ² Z : 14.7 m/s ²	X : 4.2Hz Z : 11.9Hz
U-hv-2	流水中 (上下差圧 0.3MPa)			
U-v-3	流水中 (上下差圧 0.3MPa)	Z	14.7m/s ² +1.48m/s ²	11.9Hz +1.0Hz

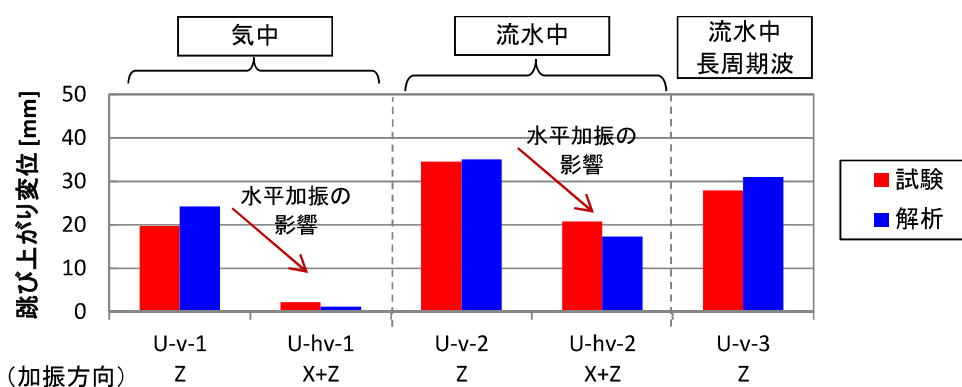
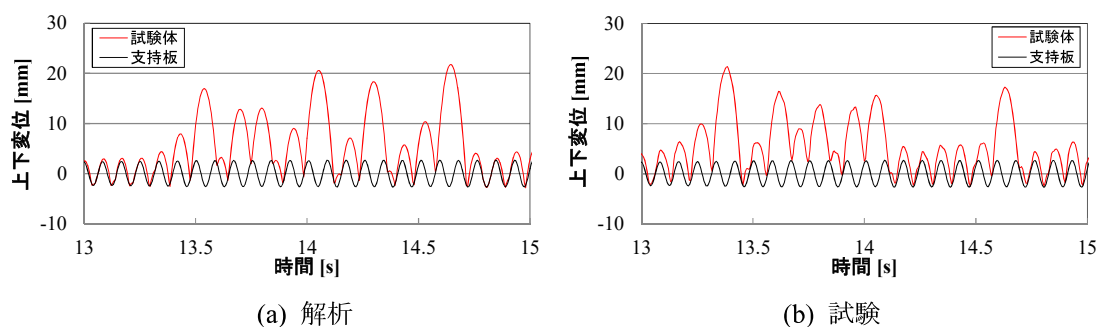


図 4.20 最大跳び上がり変位

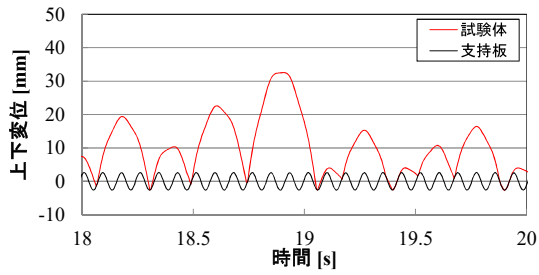


(a) 解析

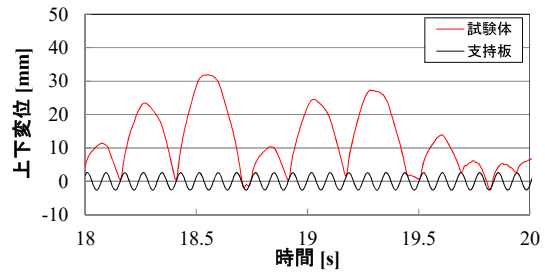
(b) 試験

図 4.21 上下加振(U-v-1)における跳び上がり挙動

(気中 正弦波 上下単独加振: 11.9Hz 14.7m/s²)



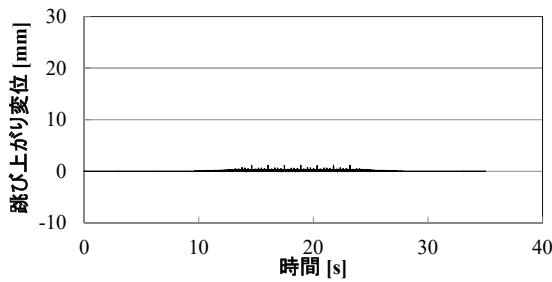
(a) 解析



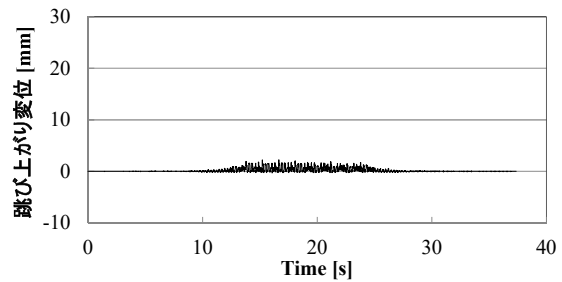
(b) 試験

図 4.22 上下加振(U-v-2:流水中)における跳び上がり挙動

(流水中 正弦波 上下単独加振:11.9Hz 14.7m/s²)



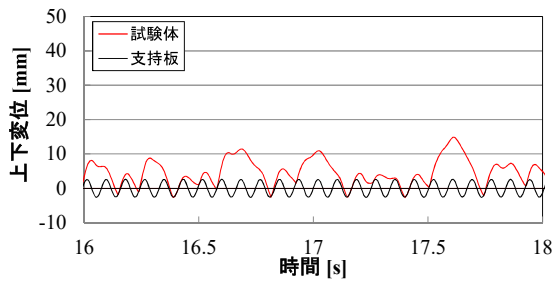
(a) 解析



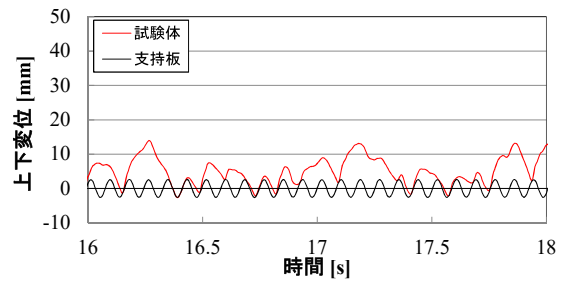
(b) 試験

図 4.23 水平+上下加振(U-hv-1)における跳び上がり挙動

(気中 正弦波 水平+上下加振:4.2Hz 3.9m/s² + 11.9Hz 14.7m/s²)



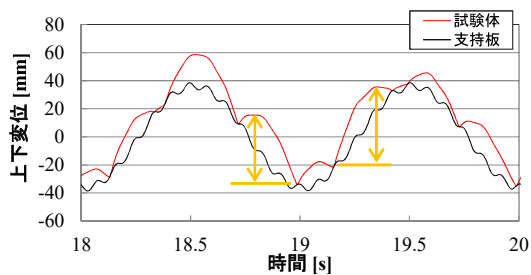
(a) 解析



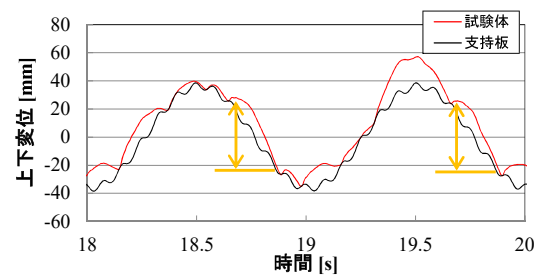
(b) 試験

図 4.24 水平+上下加振(U-hv-2:流水中)における跳び上がり挙動

(流水中 正弦波 水平+上下加振:4.2Hz 3.9m/s² + 11.9Hz 14.7m/s²)



(a) 解析



(b) 試験

図 4.25 上下変位(U-v-3)

(流水中 正弦波 上下単独加振:11.9Hz 14.7m/s² + 1Hz 1.48 m/s²)

4.4.2. 縮尺 37 体群体系

縮尺 37 体群体系の正弦波加振において、上下変位応答(跳び上がり挙動)を試験と解析で比較することで、解析の妥当性を検証する。加振試験の試験条件を表 4.5 に示す。

全計測点における最大跳び上がり変位を試験条件毎に図 4.26 に示す。なお、各試験ケースにおける最大跳び上がり変位は、各加振(9回)の最大跳び上がり変位の平均値としている。最大跳び上がり変位は全試験ケースにおいて試験と解析でよい一致を示しており、気中、水中および流水中の雰囲気の違いと、水平応答の有無が、跳び上がり変位に及ぼす影響を解析で適切に評価できていることがわかる。

以下に試験ケース毎に各計測位置の最大跳び上がり変位について示す。気中、水中および流水中の正弦波上下加振の最大跳び上がり変位を図 4.27 に示す。いずれの条件においても跳び上がり変位は試験と解析で近い傾向を示した。群内側になるほど跳び上がり変位は大きくなっており、炉心支持板の上下応答による影響を解析で模擬できていることが確認できる。次に、正弦波水平+上下加振における跳び上がり変位を図 4.28 に示す。上下加振に水平加振が加わることで、水平応答によって生じるエントランスノズルの摩擦力が跳び上がり変位に及ぼす影響を解析で適切に評価できていることがわかる。

表 4.5 縮尺 37 体群体系 試験条件(跳び上がり挙動の検証)

試験ケース	雰囲気	加振波(正弦波)			加振回数
		方向	レベル	振動数	
G-v-1	気中	Z	10.4m/s ²	14.6Hz	9
G-v-2	水中				9
G-v-3	流水中 (上下差圧 0.2MPa)				9
G-hv-1	気中	X+Z	X : 3.9 m/s ² Z : 14.7m/s ²	X : 5.1 Hz Z : 14.6 Hz	9
G-hv-2	水中				9
G-hv-3	流水中 (上下差圧 0.2MPa)				9

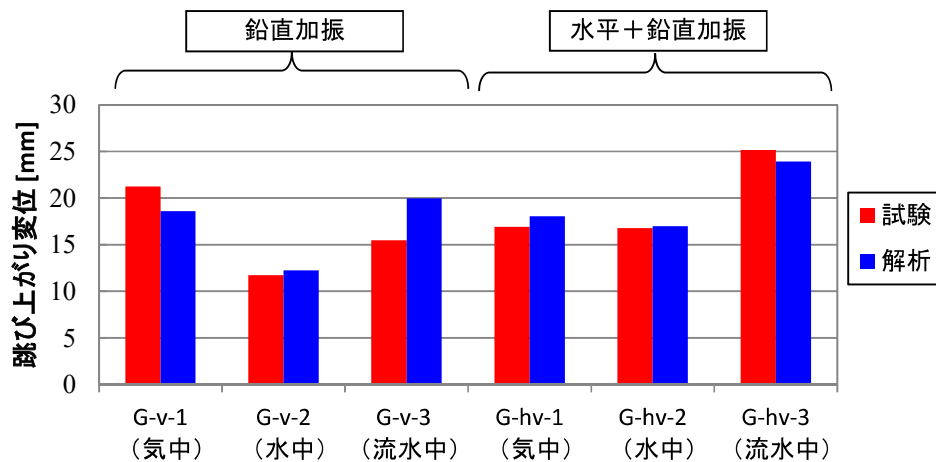
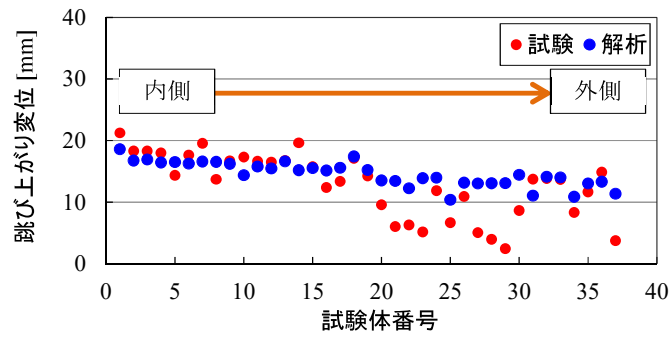
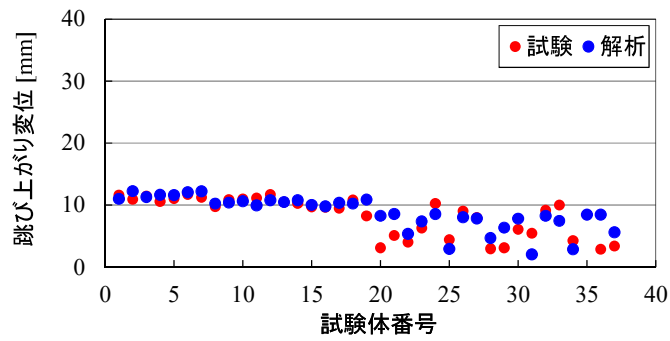


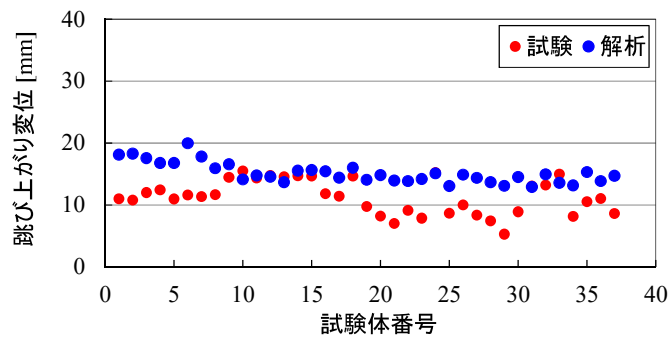
図 4.26 最大跳び上がり変位まとめ(縮尺 37 体群体系)



(a) 気中 (G-v-1)

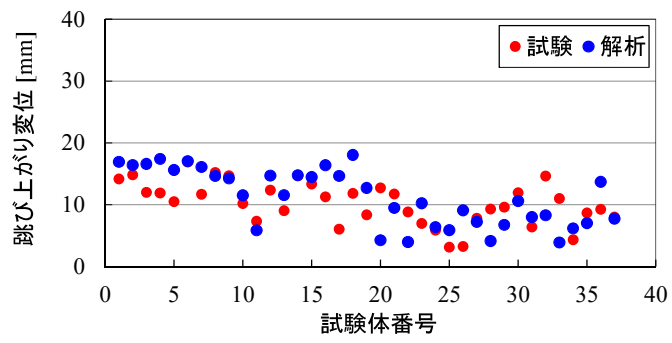


(b) 水中 (G-v-2)

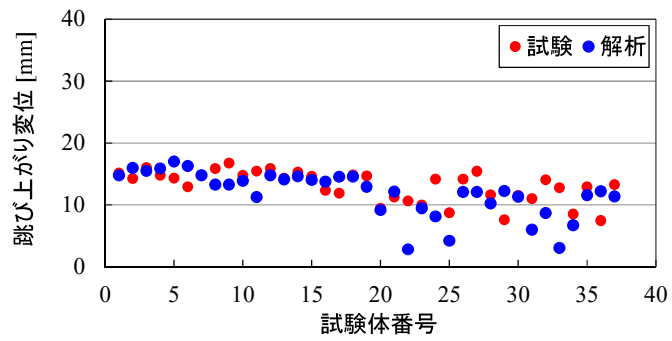


(c) 流水中 (G-v-3)

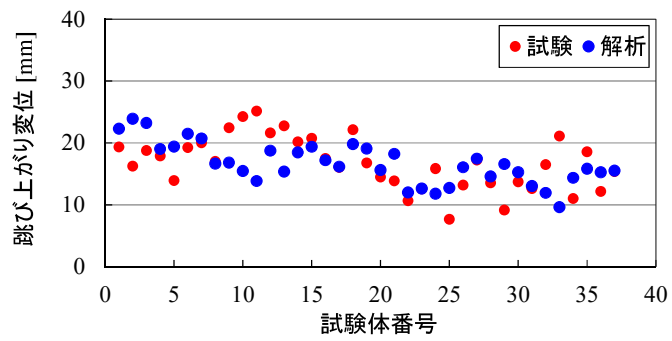
図 4.27 上下加振における跳び上がり挙動
(正弦波 上下単独加振: 14.6Hz 10.4m/s²)



(a) 気中 (G-hv-1)



(b) 水中 (G-hv-2)



(c) 流水中 (G-hv-3)

図 4.28 水平+上下加振における跳び上がり挙動
(正弦波 水平+上下加振: 5.1Hz 3.9m/s²+14.6Hz 14.7m/s²)

4.5. まとめ

本計算機コードにおける3次元炉心群振動挙動の解析の妥当性を検証した結果を以下に示す。

- ・ 縮尺 37 体群体系における気中と水中の正弦波水平加振条件において、試験と解析の衝突荷重は概ね一致しており、パッド部の衝突および流体による影響が解析で再現できていることを確認した。
- ・ 縮尺 32 体・18 体列体系における気中の正弦波水平加振条件において、試験と解析の衝突荷重及び水平変位の傾向は概ね一致しており、体数が長い列体系において水平挙動が解析で再現できていることを確認した。
- ・ 水中の313体多数体系の地震波水平加振において、試験と解析の頂部水平変位の傾向は良く一致しており、多数の群体系においても水平変位応答が適切に評価できていることを確認した。
- ・ 実寸大単体の気中と流水中において、正弦波上下加振と正弦波水平+上下加振を実施し、試験と解析で跳び上がり挙動は近い傾向であることを確認した。気中と流水中の雰囲気の違いと、水平応答による摩擦力の有無が跳び上がり変位に及ぼす影響について、解析で適切に評価できていることを確認した。
- ・ 実寸大単体において、長周期波を重畳させた上下正弦波加振を実施し、長周期波が跳び上がり変位へ及ぼす影響を本解析手法で模擬できていることを確認した。
- ・ 縮尺 37 体群体系において、正弦波上下加振と正弦波水平+上下加振を実施し、試験と解析で跳び上がり挙動は近い傾向であることを確認した。炉心支持板の上下応答が跳び上がり変位に及ぼす影響について、解析で適切に評価できていることを確認した。

従って、本計算機コードの当該機能は適切なものである。

また、上記に加えて、今回の申請で行う解析の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。

以上から、本計算機コードを3次元炉心群振動挙動の解析に使用することは妥当である。

5. 参考文献

- [1] 藤田勝久, 流体中の棒群の振動特性と地震応答解析, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.47, No.415, 1981, pp.251-262.
- [2] Fritz,R.J., The effect of liquids on the dynamic motions of immersed solids, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, February, 1972, pp.167-173.

査読付き論文

- ① 岩崎晃久, 廣田和夫, 門出匡胤, 碓本岩男, 高速炉の炉心耐震解析手法の構築, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.839, 2016.

国際会議講演論文(査読付き)

- ① Iwasaki,A., Hirota,K., Monde,M., Matsubara,S. and Ikarimoto,I., Development of a Core Seismic Analysis Method for a Fast Reactor, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2016-63454, (2016) .
- ② Iwasaki,A., Sawa,N., Matsubara,S., Kitamura,S. and Okamura,S., Core Seismic Experiment of a Full-Scale Single Model for a Fast Reactor, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2016-63461, (2016) .
- ③ Iwasaki,A., Matsubara,S., Yamamoto,T., Kitamura,S. and Harada,H., Core Seismic Experiment and Analysis of Full Scale Single Model for Fast Reactor, Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2017-65329, (2017) .
- ④ Iwasaki,A., Matsubara,S., Yamamoto,T., Kitamura,S. and Okamura,S., Core Seismic Experiment and Analysis of Hexagonal Bundle Model for Fast Reactor, Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2017-65354, (2017) .
- ⑤ Iwasaki,A., Matsubara,S., Yamamoto,T., Kitamura,S. and Okamura,S., Core Seismic Experiment and Analysis of a Large Number of Element Models for Fast Reactor, Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2017-65357, (2017) .
- ⑥ Yamamoto,T., Iwasaki,A., Kawamura,K., Matsubara,S., and Harada,H., Fast Reactor Core Seismic Experiment and Analysis under Strong Excitation, Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2018-84466, (2018) .
- ⑦ Iwasaki,A., Matsubara,S., Kawamura,K., Harada,H., and Yamamoto,T., Fast Reactor Core Seismic Experiment of Full Scale Single Model of Control Rod, Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2018-84471, (2018) .
- ⑧ Iwasaki,A., Matsubara,S., Kawamura,K., Harada,H., and Yamamoto,T., Fast Reactor Core Seismic Analysis for Verification of Assessment Model of Control Rod, Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2018-84474, (2018) .

国内学会講演論文

- ① 北村誠司, 澤直樹, 岩崎晃久, 門出匡胤, 松原慎一郎, 岡村茂樹, 高速増殖実証炉に向けた耐震性評価技術開発(1)全体概要と要素試験, 日本原子力学会, 2010年秋の大会.
- ② 北村誠司, 澤直樹, 岩崎晃久, 門出匡胤, 松原慎一郎, 岡村茂樹, 高速増殖実証炉に向けた耐震性評価技術開発(2)実寸単体試験と解析, 日本原子力学会, 2010年秋の大会.
- ③ 岩崎晃久, 澤直樹, 門出匡胤, 松原慎一郎, 岡村茂樹, 北村誠司, 高速増殖実証炉に向けた耐震性評価技術開発(3)1/1.5縮尺模擬集合体群体系試験, 日本原子力学会, 2010年秋の大会.
- ④ 門出匡胤, 澤直樹, 松原慎一郎, 岩崎晃久, 岡村茂樹, 北村誠司, 高速増殖実証炉に向けた耐震性評価技術開発(4)1/1.5縮尺模擬集合体群体系試験解析, 日本原子力学会, 2010年秋の大会.
- ⑤ 岩崎晃久, 門出匡胤, 澤直樹, 松原慎一郎, 谷口善洋, 北村誠司, 高速増殖実証炉に向けた耐震性評価技術開発(1)1/1.5縮尺模擬集合体列体系試験, 日本原子力学会, 2011年秋の大会.
- ⑥ 門出匡胤, 岩崎晃久, 澤直樹, 松原慎一郎, 谷口善洋, 北村誠司, 高速増殖実証炉に向けた耐震性評価技術開発(2)1/1.5縮尺模擬集合体列体系試験解析, 日本原子力学会, 2011年秋の大会.
- ⑦ 岩崎晃久, 門出匡胤, 澤直樹, 碓本岩男, 谷口善洋, 北村誠司, 高速増殖実証炉に向けた耐震性評価技術開発(1)1/2.5縮尺模擬集合体多数体系試験, 日本原子力学会, 2012年春の大会.
- ⑧ 門出匡胤, 岩崎晃久, 澤直樹, 碓本岩男, 谷口善洋, 北村誠司, 高速増殖実証炉に向けた耐震性評価技術開発(2)1/2.5縮尺模擬集合体多数体系試験解析, 日本原子力学会, 2012年春の大会.
- ⑨ 岩崎晃久, 廣田和夫, 門出匡胤, 碓本岩男, 松原慎一郎, 高速炉炉心の3次元集合体変位を考慮した耐震性評価手法の構築(1)3次元炉心群振動解析手法の構築, 日本原子力学会, 2016年春の大会.
- ⑩ 岩崎晃久, 門出匡胤, 碓本岩男, 松原慎一郎, 高速炉炉心の3次元集合体変位を考慮した耐震性評価手法の高度化(1)強地震動による水平方向支持条件の変化, 日本原子力学会, 2016年秋の大会.
- ⑪ 岩崎晃久, 門出匡胤, 松原慎一郎, 碓本岩男, 高速炉炉心の3次元集合体変位を考慮した耐震性評価手法の高度化(2)熱変形・照射変形の影響評価, 日本原子力学会, 2016年秋の大会.
- ⑫ 松原慎一郎, 岩崎晃久, 川村一輝, 碓本岩男, 原田英典, 山本智彦, 高速炉炉心の耐震性評価技術開発(1)37体群体系強加振試験と解析, 日本原子力学会, 2017年秋の大会.
- ⑬ 山本智彦, 原田英典, 岩崎晃久, 松原慎一郎, 碓本岩男, 高速炉炉心の耐震性評価技術開発(2)制御棒集合体単体加振試験, 日本原子力学会, 2017年秋の大会.
- ⑭ 岩崎晃久, 川村一輝, 松原慎一郎, 碓本岩男, 山本智彦, 原田英典, 高速炉炉心の耐震性評価技術開発(3)制御棒評価モデルの検証, 日本原子力学会, 2017年秋の大会.

- ⑮ 松原慎一郎, 岩崎晃久, 川村一輝, 山本智彦, 原田英典, 高速炉炉心の耐震性評価技術開発(4) 湾曲試験体を使用した37体群体系加振試験と解析, 日本原子力学会, 2019年春の大会.
- ⑯ 松原慎一郎, 岩崎晃久, 山本智彦, 原田英典, 高速炉炉心の耐震性評価技術開発(1)313 体群体系加振試験, 日本原子力学会, 2019年秋の大会.
- ⑰ 岩崎晃久, 松原慎一郎, 山本智彦, 原田英典, 高速炉炉心の耐震性評価技術開発(2)313 体群体系加振試験解析, 日本原子力学会, 2019年秋の大会.
- ⑱ 山本智彦, 松原慎一郎, 岩崎晃久, 川村一輝, 原田英典, 高速炉炉心の耐震性評価技術開発(3) 3次元炉心群振動解析手法の開発まとめ, 日本原子力学会, 2019年秋の大会.

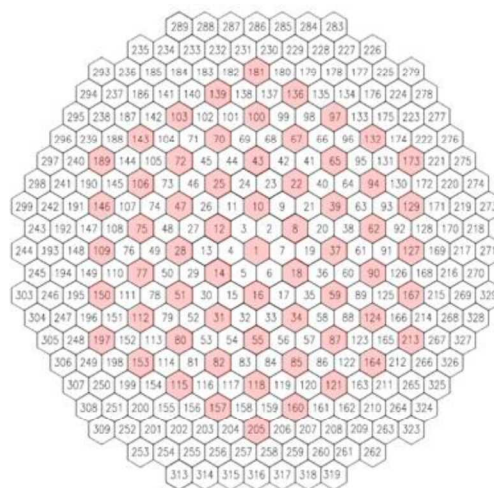
以上

別紙 3 部分装荷時における検証及び妥当性確認

はじめに

本資料では、燃料体の一部を引き抜き、通常 6 面隣接であるところを 3 面隣接とした配置（以降「部分装荷」という。）を対象とし、3 次元炉心群振動解析コード REVIAN-3D を適用する妥当性を確認した。部分装荷における燃料体装荷状態を付図 1.1 に示す。部分装荷では燃料体を抜いた箇所において隣接する燃料体の可動域が大きくなり、通常配置と比較して水平方向変位が大きくなる条件となる。

以下に、加振試験結果と解析結果の比較により、衝突荷重と水平変位について検証した結果を示す。



付図 1.1 部分装荷時の配置（ハッチ部未装荷箇所）

(1) 検証条件

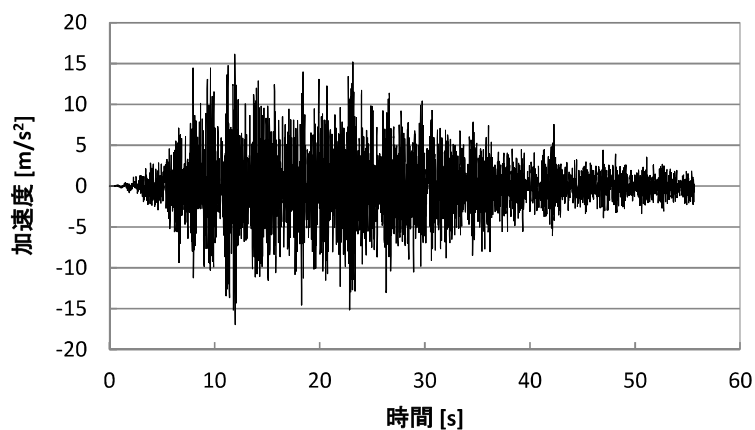
検証条件を以下に示す。なお、通常配置から部分装荷に変更することによる応答の変化を解析で表現できることを確認するため、通常配置の条件も含めて検証を実施した。

- ・ 試験装置： 313 体多数体系試験装置（縮尺比 1/2.5）（別紙 2 4.1 節参照）
- ・ 試験条件： 付表 1.1 を参照

付表 1.1 試験条件

加振試験ケース	境界条件	雰囲気	加振波
AM-C-2	通常配置	水中	模擬地震波* (付図 1.2)
AM-IM-2	部分装荷	水中	

*実機と試験体の寸法比 1/2.167 より、加速度一致の相似側から原波の時間軸を $1/2.167^{0.5}$ とする。



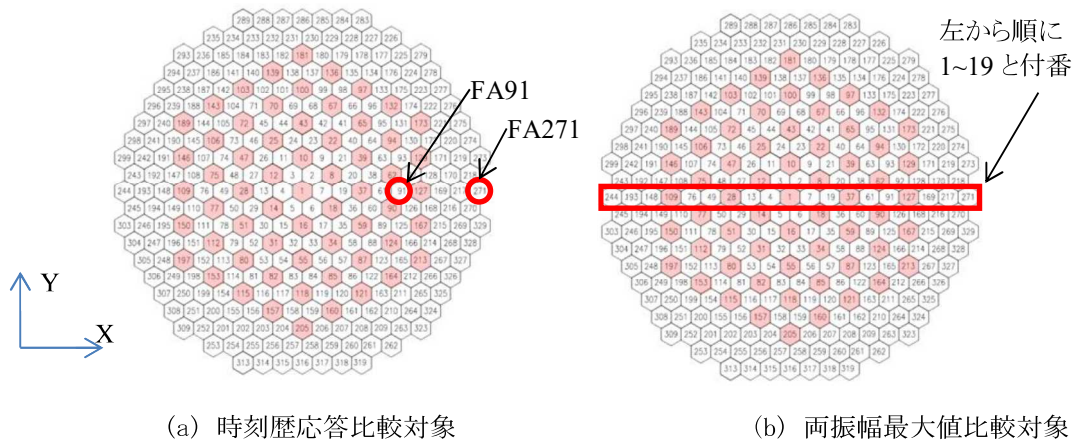
付図 1.2 模擬地震波加振波形

(2) 水平変位

試験と解析の水平変位について、313 体ある試験体のうち時刻歴波形は FA91 と FA271 を対象とし、両振幅最大値は中央列を対象として比較した（付図 1.3）。なお、水中では水面から計測点を出す必要があったため、頂部から 250mm 上方の点（試験体頂部から上方に設置した治具の位置）において計測した。そのため、水中の水平変位は頂部変位より増幅した値となっている。

両振幅の最大値を試験条件毎に付図 1.4 にまとめて示す。加振時における通常配置と部分装荷の両振幅最大値を比較すると、部分装荷は試験体が抜かれている分、水平変位の可動変位量が增大するため、変位量が増加していることがわかる。この傾向は解析でも再現することを確認した。

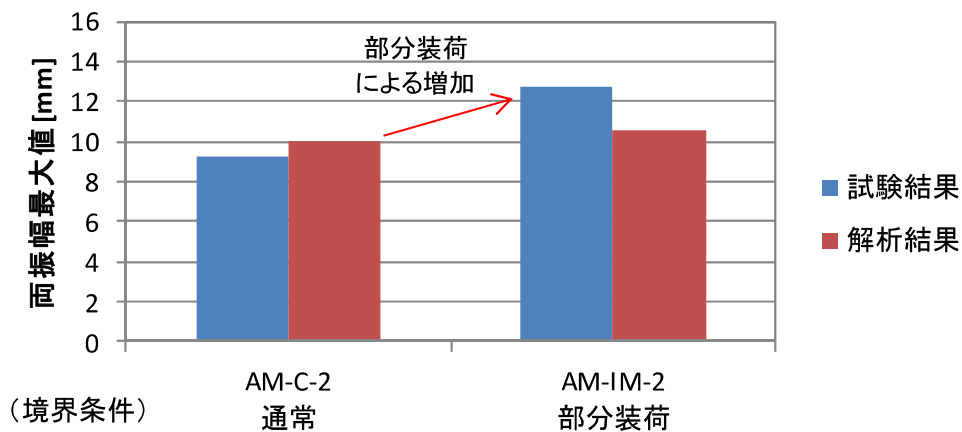
また、各計測点の水平変位の結果を試験ケース毎に付図 1.5～付図 1.6 に示す。時刻歴応答波形および両振幅最大値は試験と解析において概ね一致することを確認した。



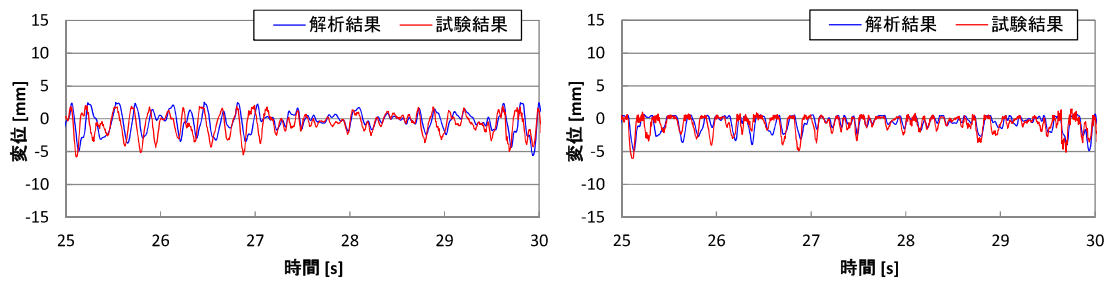
(a) 時刻歴応答比較対象

(b) 両振幅最大値比較対象

付図 1.3 水平変位の比較対象位置

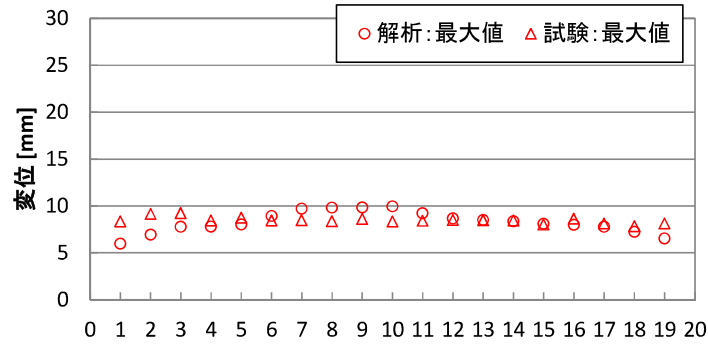


付図 1.4 両振幅最大値



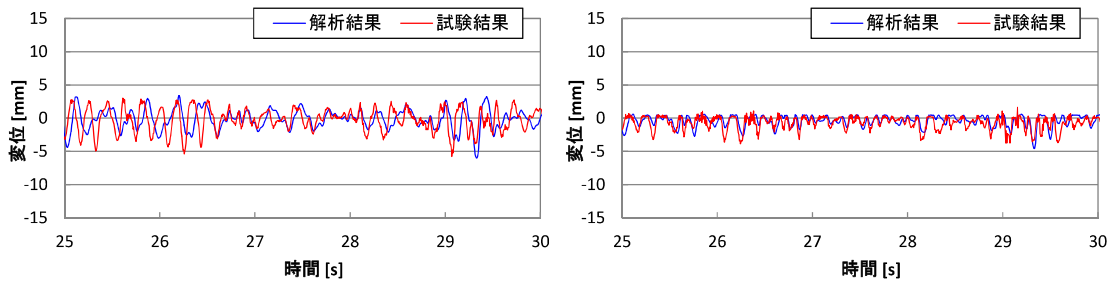
(a) 時刻歴応答比較 (FA91)

(b) 時刻歴応答比較 (FA271)



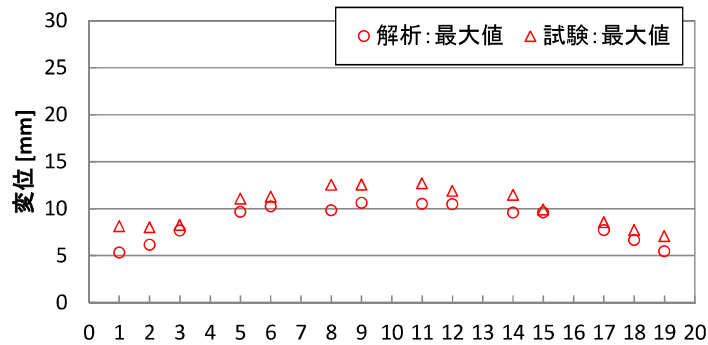
(c) X 方向水平変位 両振幅最大値

付図 1.5 水平変位の比較結果 (AM-C-2: 通常配置・水中・模擬地震波)



(a) 時刻歴応答比較 (FA91)

(b) 時刻歴応答比較 (FA271)



(c) X 方向水平変位 両振幅最大値

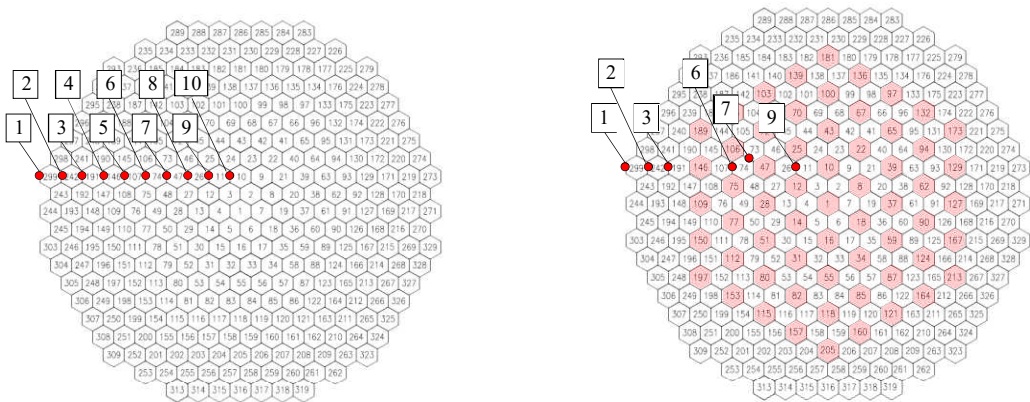
付図 1.6 水平変位の比較結果 (AM-IM-2: 部分装荷・水中・模擬地震波)

(3) 衝突荷重の検証

衝突荷重の計測は、付図 1.7 に示すとおり、外側から内側に向かって複数箇所で行った。

試験条件毎に最大衝突荷重を付図 1.8 にまとめて示す。加振時における通常配置と部分装荷の最大衝突荷重を比較すると、部分装荷で試験体が抜かれたことによる最大衝突荷重の変化は小さく、この傾向は試験と解析において同様であることを確認した。

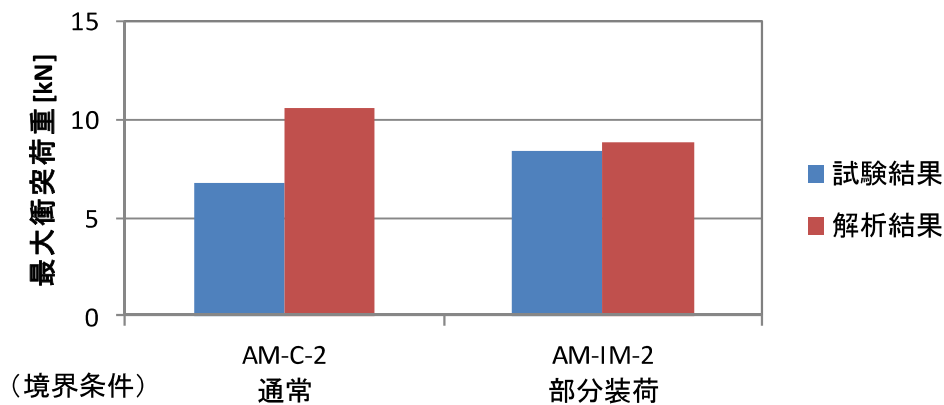
試験ケース毎に各計測点で生じた解析と試験の衝突荷重の最大値を比較した結果を付図 1.9 ~付図 1.10 に示す。衝突箇所によっては試験と解析の最大衝突荷重に差異があるが、解析では試験体の軸回りの回転や初期曲がり等を考慮していないために生じたものと考えられる。衝突箇所に対する衝突荷重の傾向は、試験と解析で概ね一致していることを確認した。



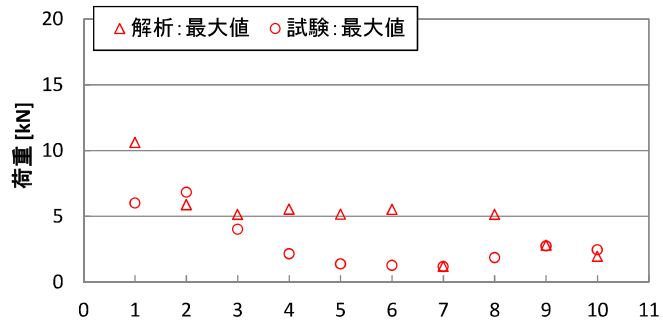
(a) 通常配置 (313 体系)

(b) 部分装荷 (ハッチ部試験体無)

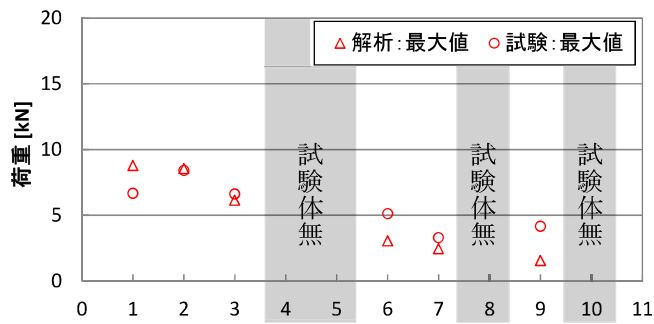
付図 1.7 衝突箇所番号



付図 1.8 最大衝突荷重



付図 1.9 衝突荷重の比較結果 (AM-C-2: 通常配置・水中・模擬地震波)



付図 1.10 衝突荷重の比較結果 (AM-IM-2: 部分装荷・水中・模擬地震波)

(4) まとめ

一部の炉心構成要素を引き抜いた部分装荷における 3 次元炉心群振動挙動の解析に REVIAN-3D を適用する妥当性を検証した。

- ・ 縮尺 313 体多数体系試験体を部分装荷とした場合の水中の地震波水平加振において試験と解析を比較した。衝突荷重と水平変位は、試験と解析で近い傾向が得られることを確認した。
- ・ 通常配置から部分装荷に変更することにより、衝突荷重の変化は小さいが、水平変位は増加する傾向にあり、この傾向は試験と解析で良好に一致することを確認した。

以上より、通常配置のみでなく部分装荷の高速炉炉心においても、本計算機コードを 3 次元炉心群振動挙動の解析に使用することは妥当である。

注：本資料に記載の内容には、経済産業省からの受託事業である「発電用新型炉等技術開発」、「高速炉等技術開発」及び「高速炉国際協力等技術開発」の一環として実施した成果を含む。

以上

別紙 4 3次元炉心群振動解析コードの実機炉心体系への適用性

本解析コードは、高速炉炉心の炉心構成要素を1体ずつモデル化し、主要な外力を取り込んだ上で、運動方程式を全炉心にわたって評価する一般性のある理論モデルに基づき構築されたコードであり、炉心構成要素の数量に関して制限等の仮定を持たないことから、「もんじゅ」を含め高速炉炉心に汎用的に適用可能なコードである。「もんじゅ」、「常陽」及び本解析コードの開発目標であった JSFR 実用炉の炉心構成の比較図を図 1 に示す。

解析コードの開発に当たって実施した試験では、炉心構成要素数 1000 体規模の実機解析に対する適用性を確認するため、Step by Step による検証を実施した。図 2 にその整備計画概要を示す。具体的には、試験体の大きさ（実寸、1/1.5 縮尺、1/2.5 縮尺）、試験体数及び試験体系（単体：1 体、群：37 体、313 体、列：18 体、32 体）を設定し、まず、単体/少数群体系試験により個々の炉心構成要素モデルに作用する外力の影響を含めた挙動が評価可能であることを確認、次に列体系試験により、実規模列数による体数増加の影響（図 3 に示すように、炉心構成要素が一方向に片寄ることでパッド間ギャップが詰まり可動域が広がるため、応答変位は列中央付近が大きく、列両端側で小さくなる）を評価可能なことを確認、更に、多数体系試験により、六角配置体系においても列体系と同様に体数増加の影響を評価可能なことを確認している。

ここで、試験で用いた試験体は、JSFR 実用炉の炉心構成要素を対象として製作したものであるが、1/1.5 縮尺試験体は概ね「もんじゅ」と同等のサイズ、1/2.5 縮尺試験体は概ね「常陽」と同等のサイズになっている。試験体等と「もんじゅ」及び「常陽」の主要諸元についての比較を表 1 に示す。また、各試験体系の概要を図 4 に、妥当性検討結果の

比較を表 2 に示す。特に「もんじゅ」の燃料体と 1/1.5 縮尺試験体を比較すると、全長については異なるものの、重量、ラップ管板厚、パッド部対辺間距離については同程度のジオメトリを有しており、評価対象である地震時の燃料体挙動に関してはほぼ同等の挙動を示すと考えられる。

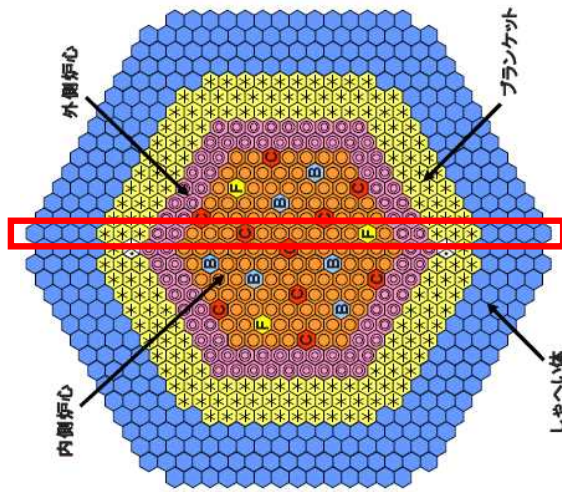
また、「もんじゅ」の全炉心構成要素数は 715 体であることに対して、試験では多数体系試験においても最大 313 体であるが、本解析コードは炉心構成要素数についての制限を設けていないこと、「もんじゅ」炉心の最大列体数 30 体は、32 体の列試験体系試験及び検証解析によって包絡されていること、多数体系試験により六角配置体系においても列体系に見られる挙動が適切に模擬できていることから、多数体系試験の最大体数である 313 体を超えた炉心構成要素数の炉心に対しても本解析コードを適用することに問題はない。

以上より、本解析コードを用いた評価手法を高速炉の実機炉心体系に適用することは妥当である。

注：本資料に記載の内容には、経済産業省からの受託事業である「発電用新型炉等技術開発」、「高速炉等技術開発」及び「高速炉国際協力等技術開発」の一環として実施した成果を含む。

以上

もんじゅ

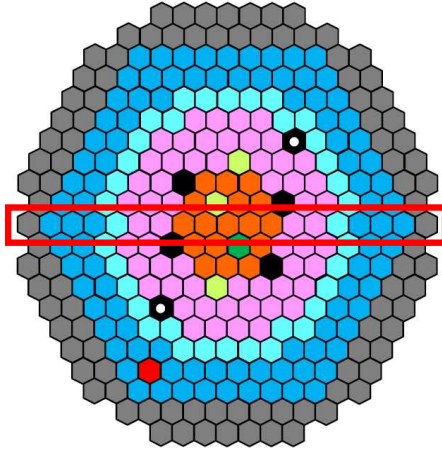


最大列体数30体

炉心構成要素名	体数
内側炉心燃料集合体	108
外側炉心燃料集合体	90
ブランケット燃料集合体	172
微調整棒集合体 (FCR)	3
粗調整棒集合体 (CCR)	10
後備炉停止棒集合体 (BCR)	6
中性子源集合体	2
しゃへい体集合体	324

合計715体

常陽

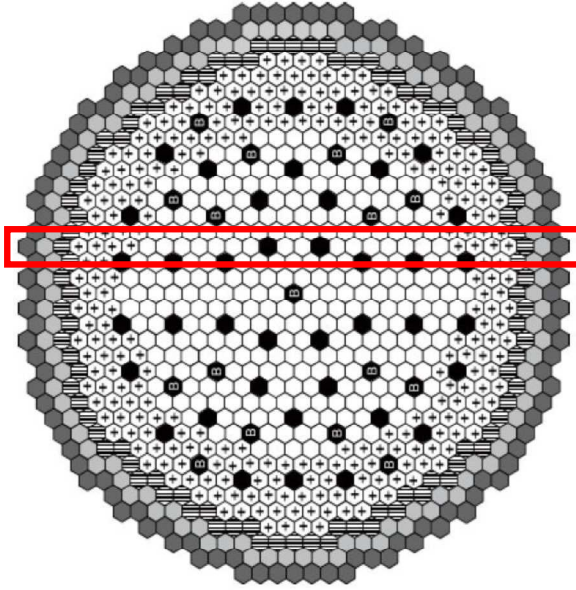


最大列体数19体

炉心構成要素	装荷数 (体)
内側燃料集合体	17
外側燃料集合体	58
照射燃料集合体	3
制御棒	4
後備炉停止制御棒	2
内側反射体	36
外側反射体	95
材料照射用反射体	1
遮へい集合体	96
中性子源	1

合計313体

JSFR実用炉



最大列体数32体

内側炉心燃料集合体	288体
外側炉心燃料集合体	274体
径方向ブランケット燃料集合体	96体
主炉停止系制御棒	40体
後備炉停止系制御棒	17体
ステンレス鋼遮へい体	102体
Zr-H遮へい体	108体

合計925体

図1 実機炉心構成の比較

整備計画方針：

- 高速炉炉心の3次元挙動を模擬できる手法（コード）は他に存在しないため、構築したREVIAN-3Dの妥当性確認には、高速炉炉心の地震時炉心挙動に係る加振試験結果等との検証解析により示す。
- 試験計画は、単純な体系からより多数の複雑な挙動を模擬する体系へとStep by Stepにより実施。

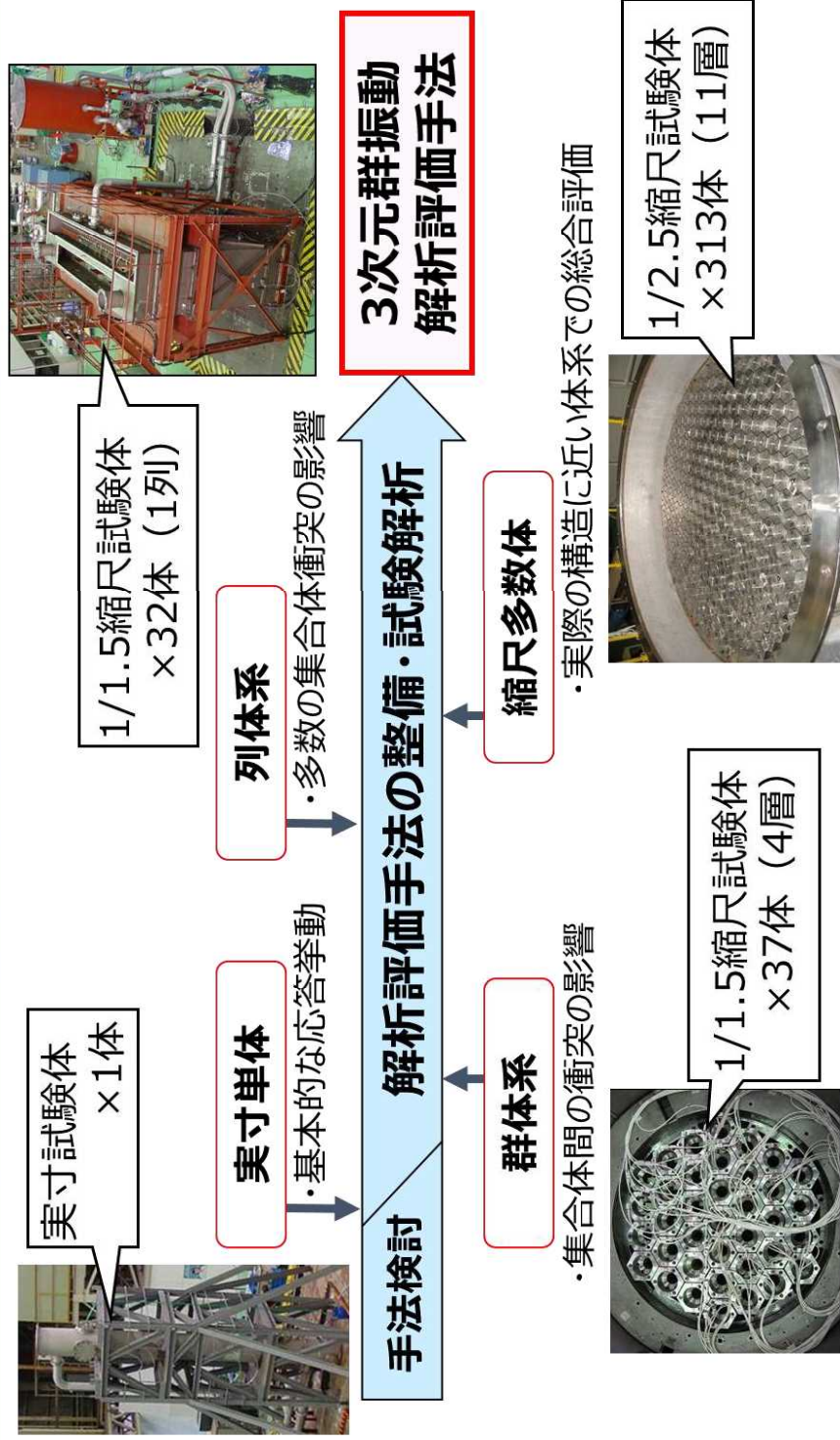
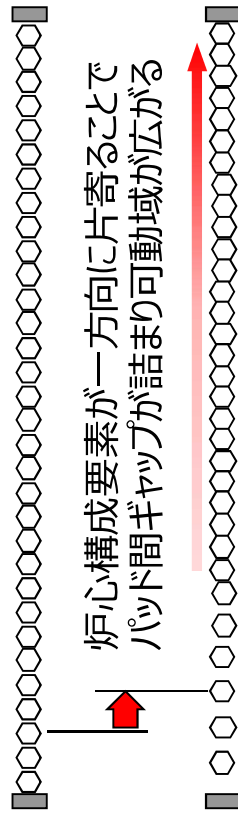


図 2 3次元群振動解析評価手法の整備計画

実規模列数による体数増加の影響

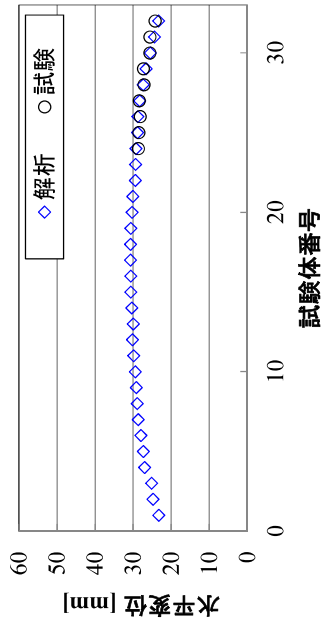


変位(両振幅)は中央が大きく
両端で小さくなる。

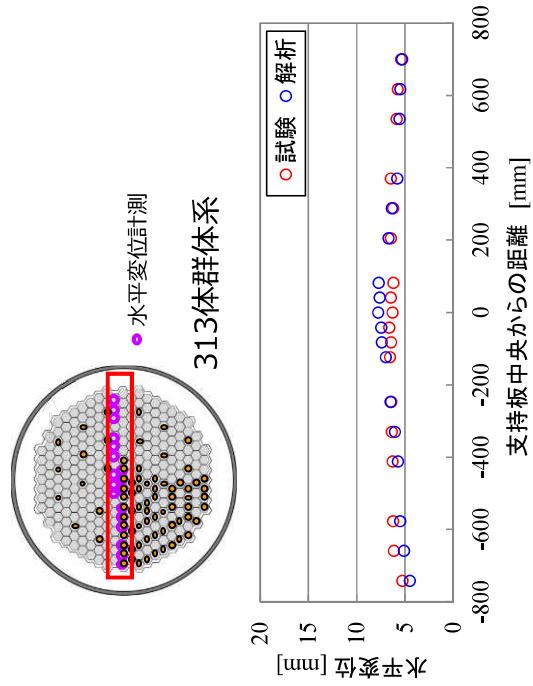
列体系試験結果



32体列体系



多数体系試験結果



313体群体系

図 3 実規模列数による体数増加の影響

表 1 もんじゅ燃料体及び各試験体系の試験体主要寸法比較

	もんじゅ燃料体	常陽	実寸試験体 (JSFR実用炉)	1/1.5縮尺 試験体	1/2.5縮尺 試験体
主要材質	SUS316鋼 SUS316相当鋼	SUS316相当鋼 高Niオーステナイト系 ステンレス	SUS304	SUS304	SUS304 (模擬重量体： 炭素鋼)
全長	4.2m	約3m	約4.6m	約3m	約1.9m
重量	約180kg	約60kg	約650kg	約185kg	約38kg
ラッパ管板厚	3mm	1.9mm	5mm	2mm	1.5mm
パッド部 対辺間距離	114.9mm	81.2mm	205mm	136.7mm	82.0mm

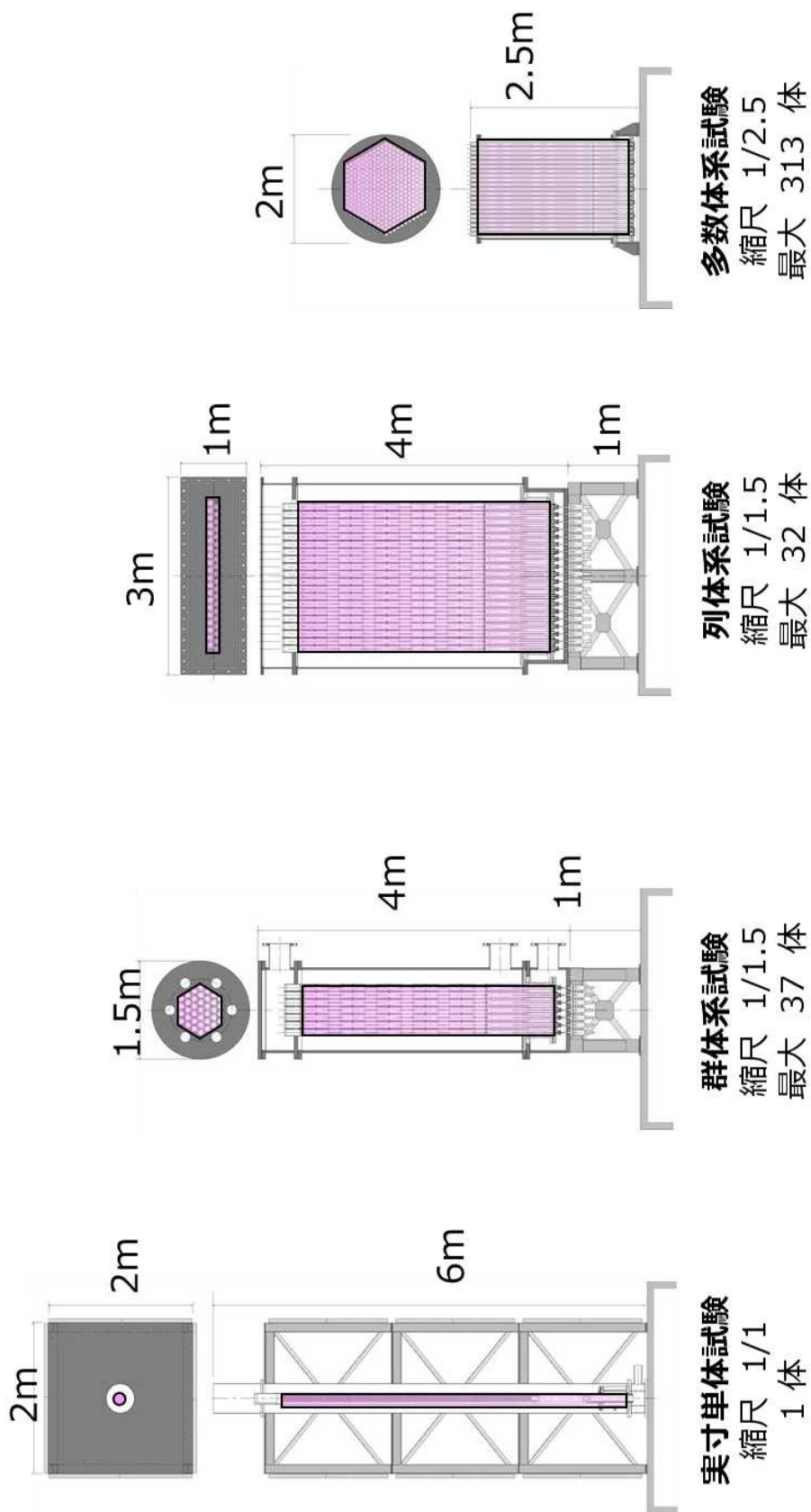


図 4 各試験体系の比較

表 2 各試験体系の比較

	実寸単体試験	1/1.5縮尺 群体系試験	1/1.5縮尺 列体系試験	1/2.5縮尺 多数体系試験
概要	単体挙動確認試験	群体系特有の事象（流体構造連成挙動等）を模擬した37体群体系試験	実機炉心相当の水平挙動を模擬した32体列体系試験	実機に近い集合体数の多数体群体系振動試験
取得した 検証データ	単体解析モデルの検証用データ（各部衝突モデル、水平ビームモデル、跳び上がりモデル、上下方向流体力、タツシユポット効果）	群体系解析モデルの検証用データ（流路網計算、炉心支持板連成効果、群体系における相互干渉）	実機相当炉心の水平挙動時の跳び上がり及びパッド部衝突荷重の妥当性確認用データ	実規模体数での跳び上がりの妥当性確認用データ
妥当性の 確認	単体試験体における跳び上がり量、衝突荷重、水平変位の時刻歴波形について解析結果と比較	群37体における跳び上がり量、水平変位、衝突荷重の最大値、RMS値について解析結果と比較	列18体（ノミナルピッチ）、列32体（狭ピッチ）における跳び上がり量、水平変位、衝突荷重の最大値、RMS値について解析結果と比較	127体、313体における多数規模の群挙動における跳び上がり量の最大値・RMS値について解析結果と比較
結果	跳び上がり量、水平変位、衝突荷重ともに、試験と解析で概ね一致。	跳び上がり量は炉心中央がより大きく、衝突荷重は外周になるほど大きくなる傾向を再現。 跳び上がりは水平加振により抑制される傾向を再現。跳び上がり量を一部過度に保守的に評価。	跳び上がり量、水平変位、衝突荷重の最大値のレベルは試験と解析で概ね一致。衝突荷重は端になるほど大きくなる傾向を再現。	炉心中央に近い試験体ほど跳び上がりが大きくなる傾向を再現。跳び上がり量は全体的に解析の方が保守的な評価。