

「もんじゅ」廃止措置計画の変更内容 (模擬燃料体の部分装荷)

解析手法・モデルの妥当性

2019年12月 9日

日本原子力研究開発機構 (JAEA)

開発の目的

3次元群振動を考慮した、高速増殖炉炉心の耐震設計評価手法を確立する。

常陽、もんじゅ、実証炉等に
共通して使用できる汎用性の
あるコード

開発の概要

○ **3次元群振動試験**

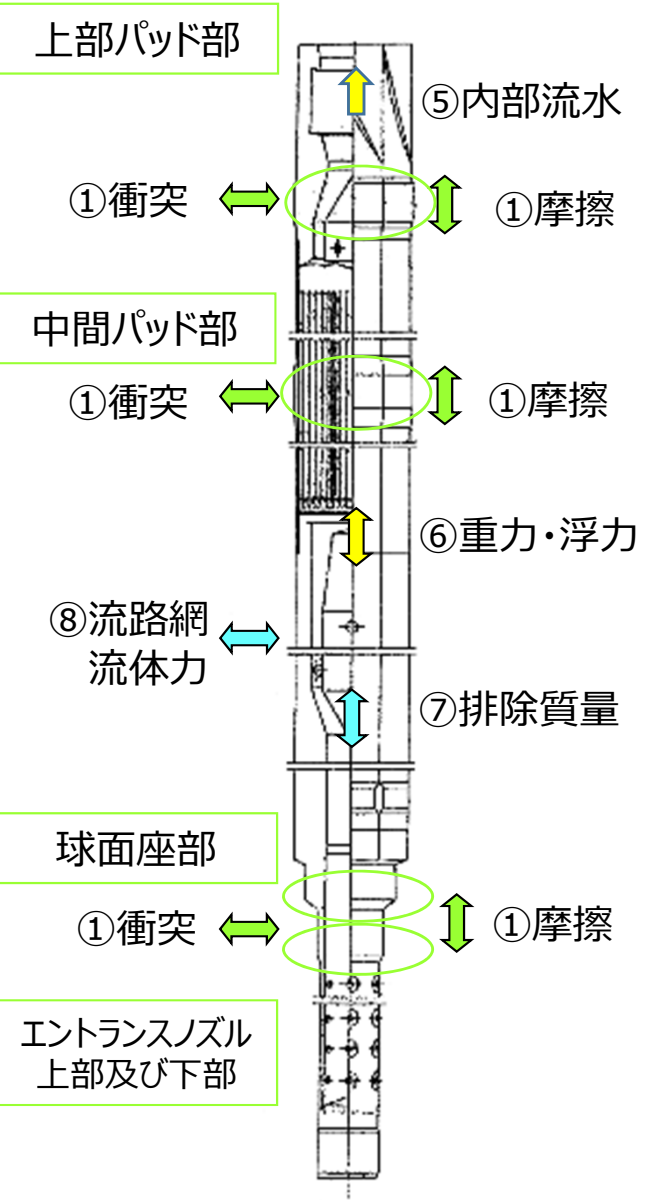
炉心の動的応答挙動に関する基礎データを取得する。

特定炉型のモックアップ試験
ではない。

○ **3次元群振動解析評価手法の整備**

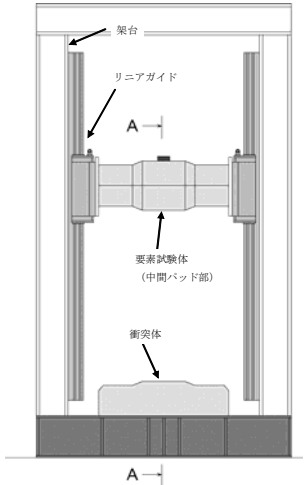
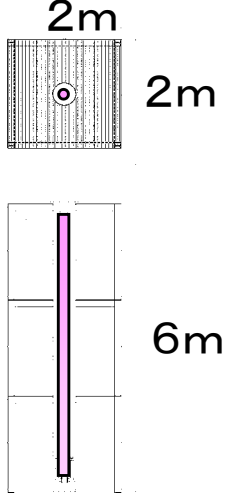
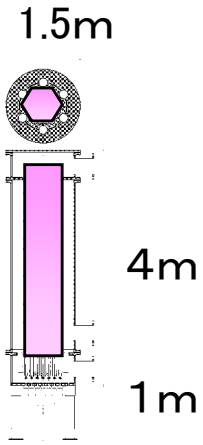
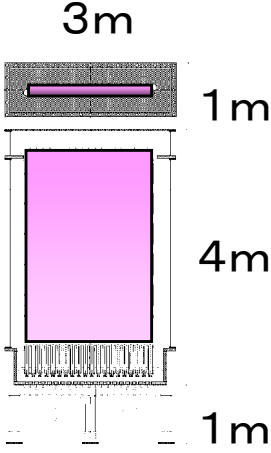
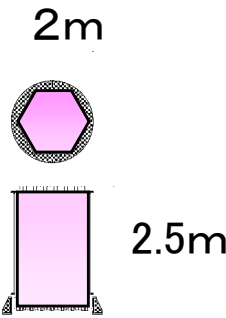
試験の解析評価を通じて、妥当性が確認された解析評価手法を整備する。

1. 試験計画 【群振動への主要な影響因子】



	影響因子	解析評価に必要なパラメータ	必要な試験
1	パッド部・エントランスノズルの衝突	反発係数 (バネ剛性、減衰定数) 摩擦係数	パッド部の衝突試験 ノズル部の衝突試験 集合体の落下試験
2	パッド部の隙間	パッド部のギャップ	単体試験、列体系試験
3	エントランスノズル部の隙間	エントランスノズル部の隙間	単体試験
4	隣接要素との衝突状況	六角柱に対する加振方向	単体試験、群体系試験
5	水平方向の変位の拘束状況	列数	列体系試験、群体系試験
6	重力、浮力、内部流水による差圧	等価重力加速度	単体試験、群体系試験
7	流体排除質量	流速	単体試験
8	集合体壁面 水平方向の流体力	流体付加質量	単体試験、群体系試験

1. 試験計画 【試験体系の検討】

要素試験 各試験体の 衝突部位モデル	実寸単体試験 縮尺 1/1 1 体	群体系試験 縮尺 1/1.5 最大 37 体	列体系試験 縮尺 1/1.5 最大 32 体	多数体試験 縮尺 1/2.5 最大 313 体
				
<p>各縮尺試験体について、以下の衝突部位のパラメータ</p> <ul style="list-style-type: none"> 上部パッド (ハンドリングヘッド) 中間パッド エントランスノズル 	<ul style="list-style-type: none"> 気中、水中、流水中 試験容器と衝突⇒炉心構成要素同士の衝突データを取得できるように群体系試験が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 気中、水中、流水中 炉心構成要素の変位が拘束されるため列体系試験が必要 さらに縮尺比を大きくした(試験装置の模擬性を犠牲にした)多数体試験で構成用の変位挙動を確認する 	<ul style="list-style-type: none"> 気中、水中、流水中 実機状況に近い変位を実現できるので、主に衝突に係るデータを取得。 要素間のギャップの影響データを取得 炉心構成要素の周辺の流体の状況が異なるため、特別な解析モデルとする 	<ul style="list-style-type: none"> 気中、水中 水平変位、跳び上がり量を計測 衝突部の隙間1mm以下を忠実に縮小することは困難。また、衝突力は計測しない⇒上部パッドのみ設ける 流量配分機構を設けない(流水中のデータは取得しない)

1. 試験計画 【解析評価手法の整備】

単純な体系から実際に近い体系へ、段階的に妥当性を確認



実寸単体試験

- 基本的な衝突の影響
- 加振方向の影響
- パッド・ノズル隙間の影響
- 等価重力加速度の影響

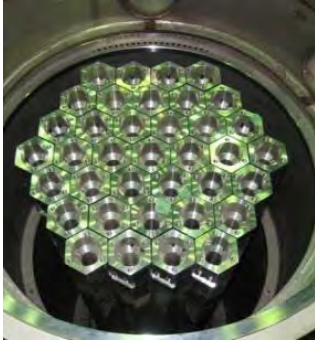
列体系試験

- パッド部隙間の影響
- 水平応答変位の拘束状況（列数）
- 異種集合体間の衝突の影響



手法検討 / 解析評価手法の整備・試験解析

**3次元群振動
解析評価**

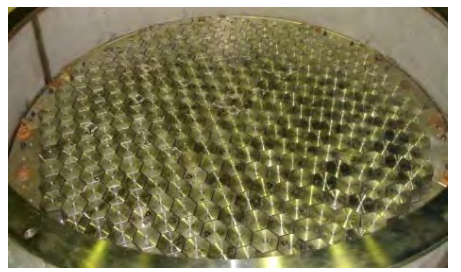


群体系試験

- 隣接要素との衝突の影響
- 異種集合体間の衝突の影響
- 流体付加質量の影響

縮尺多数体群振動試験

- 水平応答変位の拘束状況（層数）
- 流体付加質量の影響
- 炉心支持板の振動との連成



2. 要素落下試験【試験体の衝突特性】

群振動試験の評価の準備

試験体の
衝突部位
のモデル

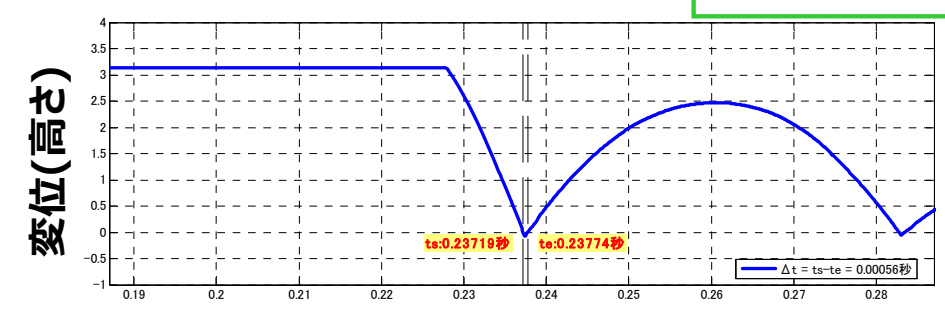
- 実寸 ハンドリングヘッド
- 中間部パッド
- エントランスノズル
- 1/1.5 ハンドリングヘッド
- 中間部パッド
- エントランスノズル
- 1/2.5 ハンドリングヘッド
- エントランスノズル



中間パッドのモデル

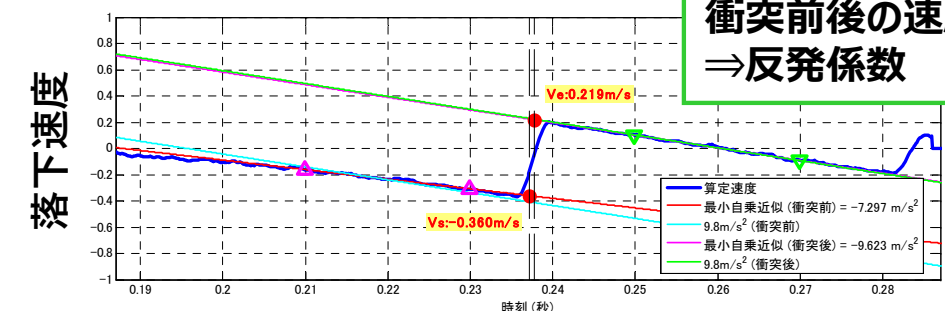
落下試験変位の時刻歴

接触時間測定

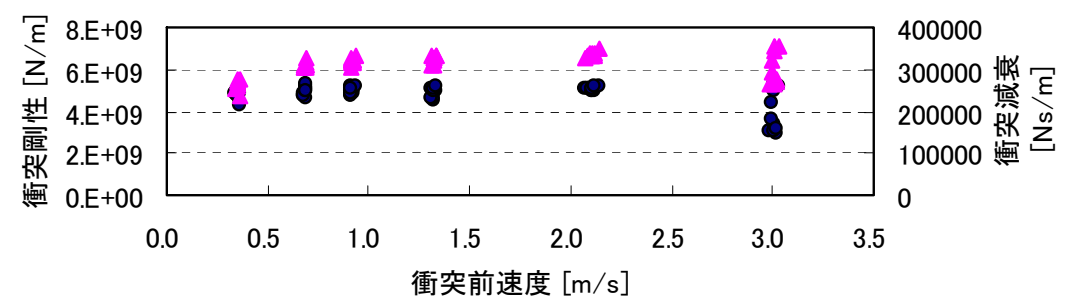


落下速度の時刻歴

衝突前後の速度
⇒反発係数



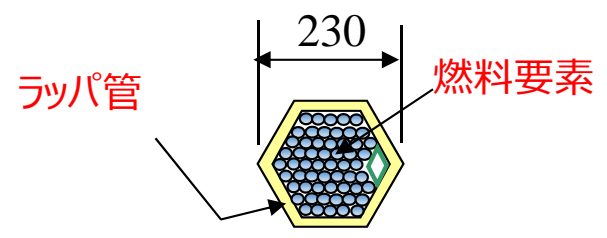
● 衝突剛性 [N/m] ▲ 衝突減衰 [Ns/m]



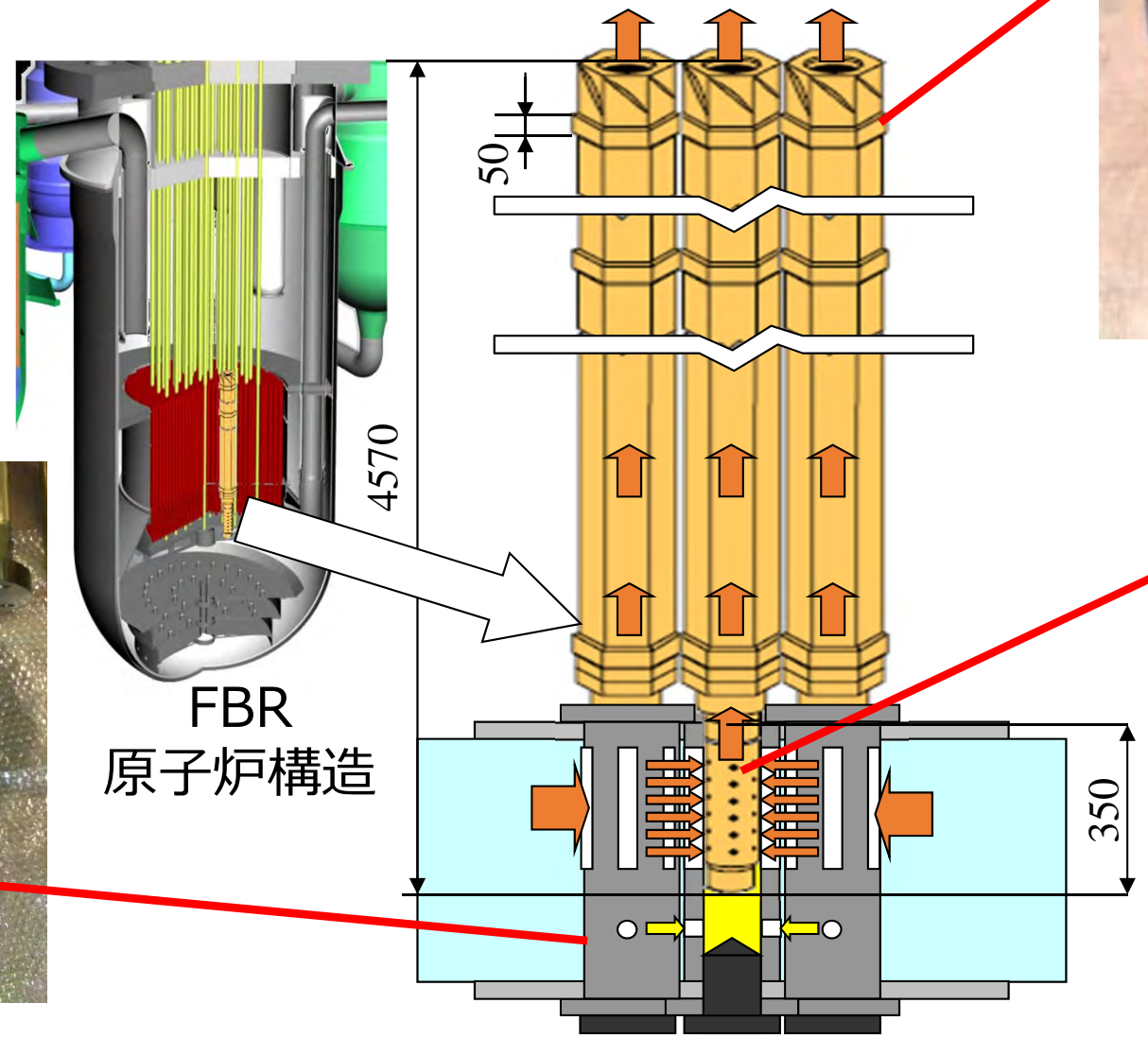
衝突剛性・減衰定数

3. 実寸単体試験 【試験装置の概要】

FBR燃料集合体の寸法・構造・圧損を模擬した実寸試験体



上部パッド部



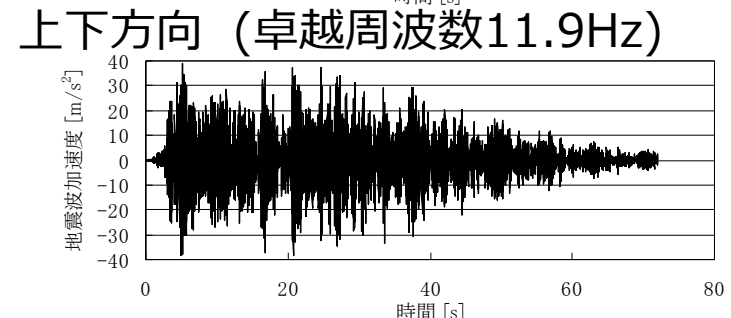
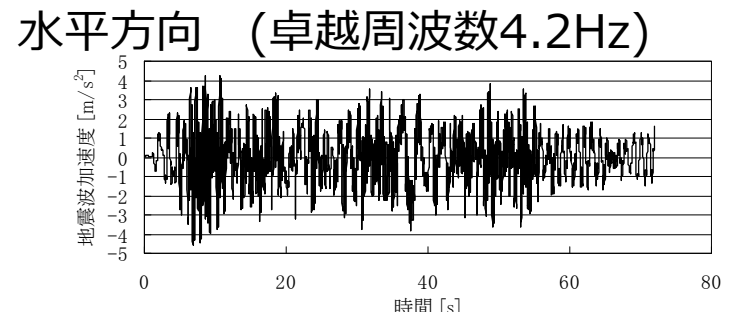
連結管



エントランスノズル

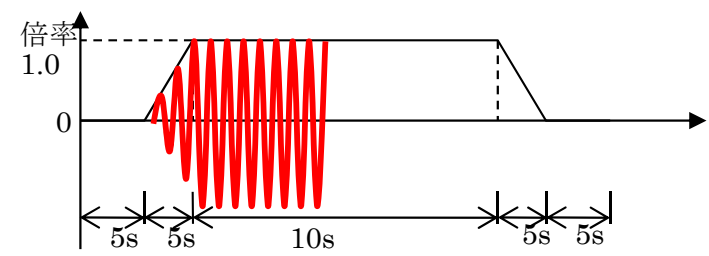
3. 実寸単体試験【入力加振波】

想定地震動における炉心支持板応答を模擬した地震波および炉心支持板の卓越周波数による正弦波で加振

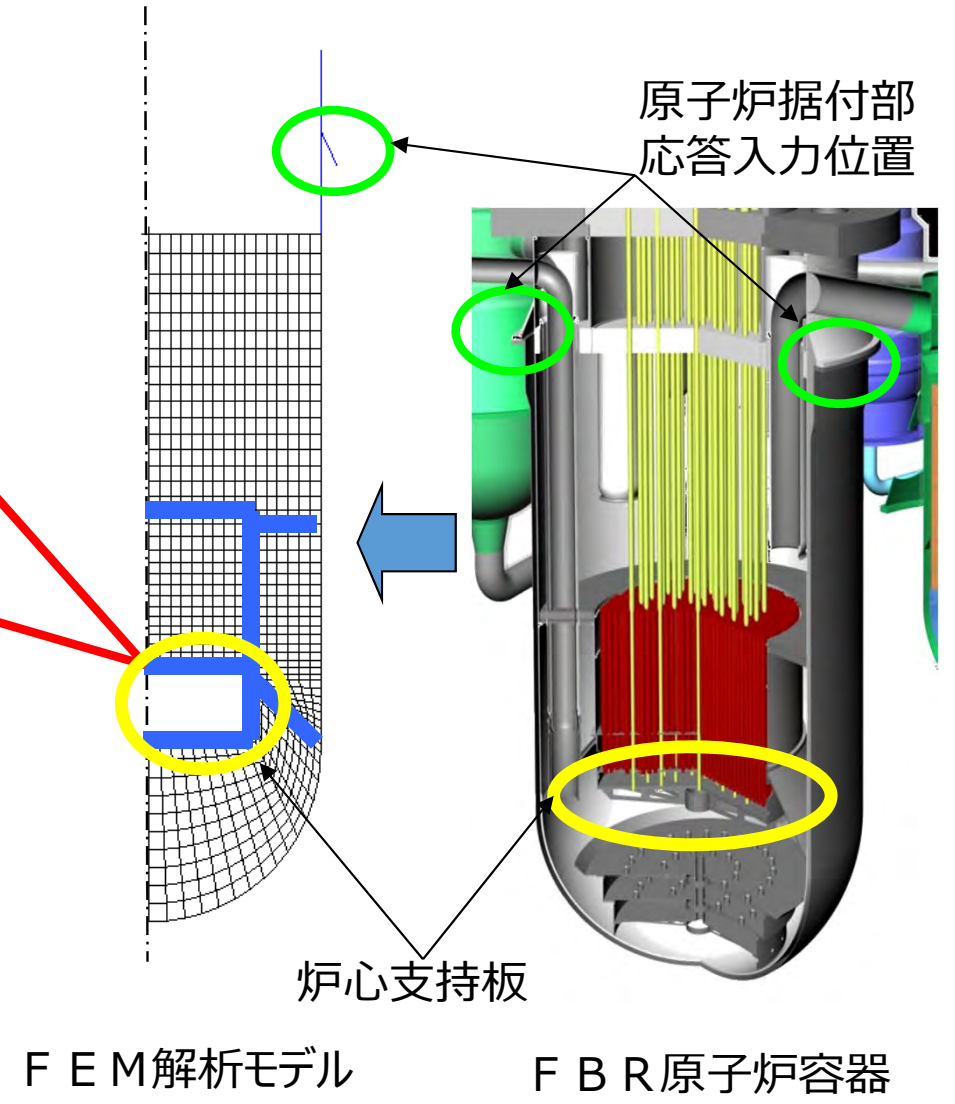


炉心支持板応答 (地震波加振波形)

卓越周波数の分析

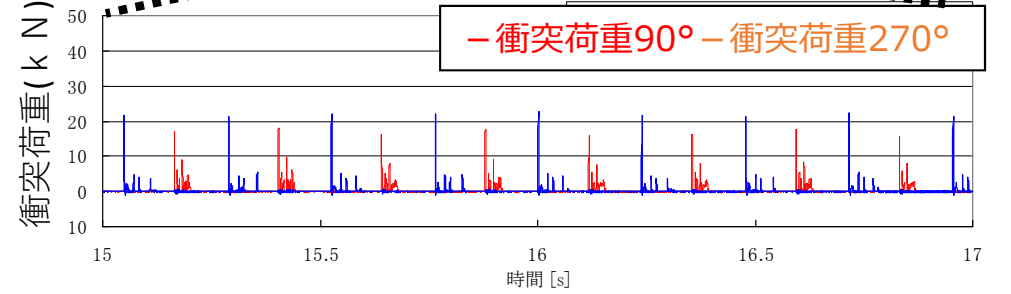
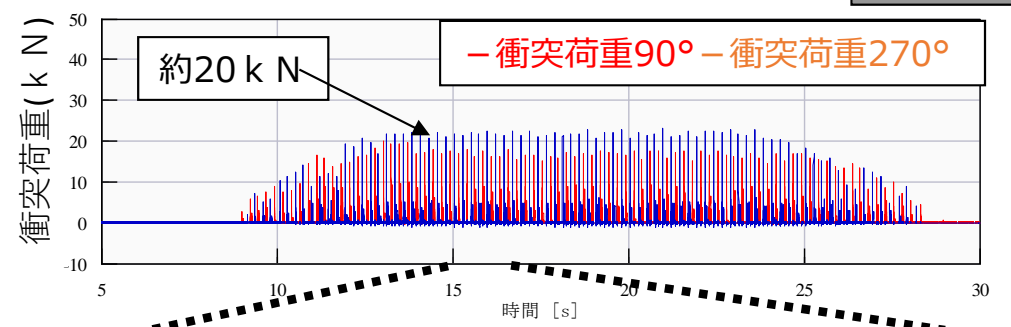
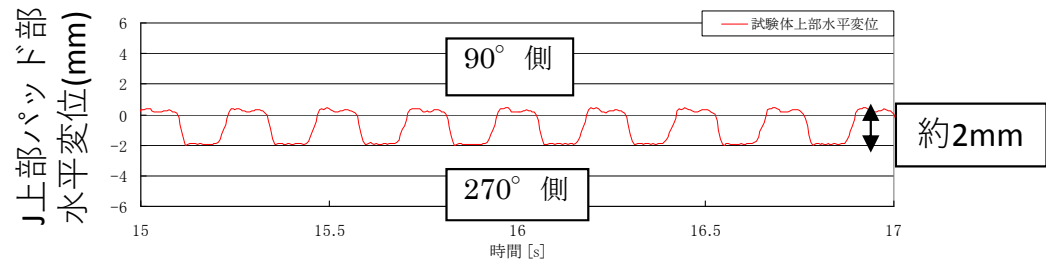
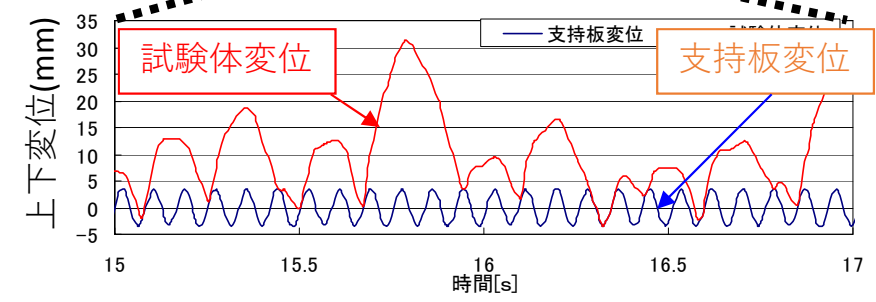
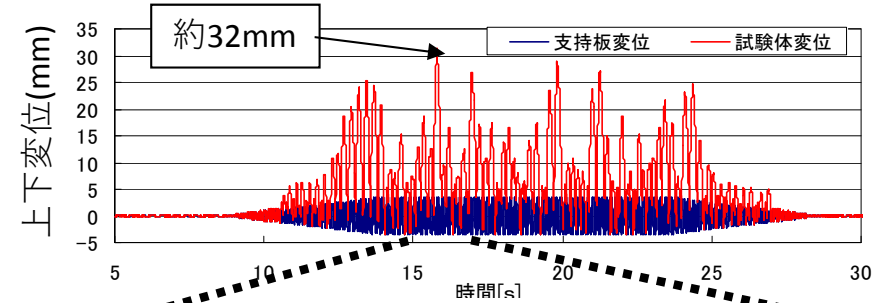
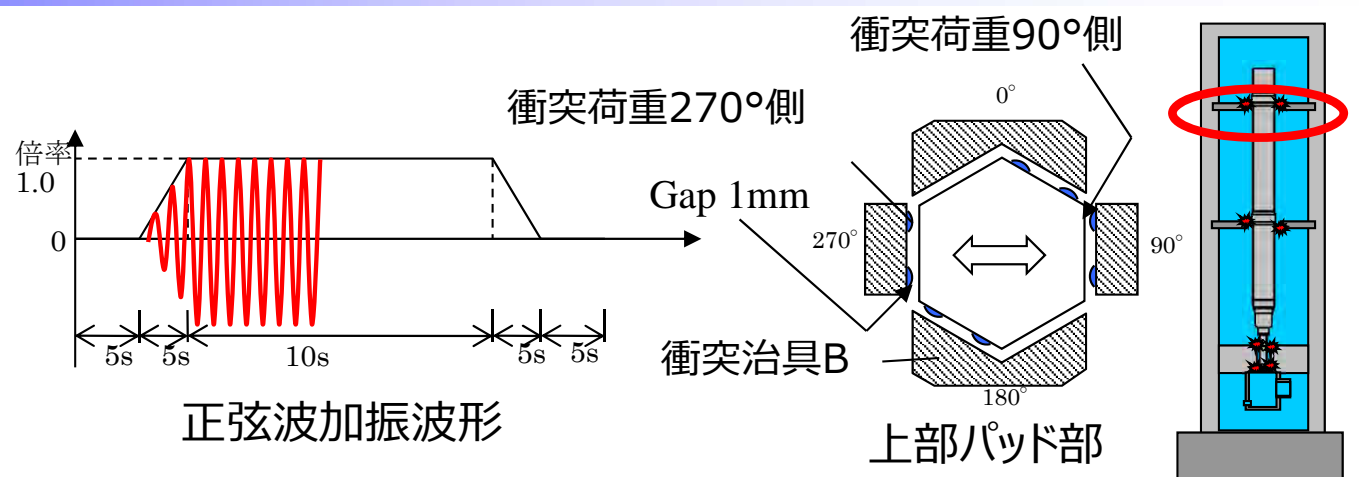


正弦波加振波形



3. 実寸単体試験【上下+水平加振試験結果】

加振波：正弦波
 雰囲気：水中(流体力100%)
 加振方向：水平+上下加振
 (水平) 加振レベル：3.9m/s²
 加振振動数：4.2Hz
 (上下) 加振レベル：19.6m/s²
 加振振動数：11.9Hz

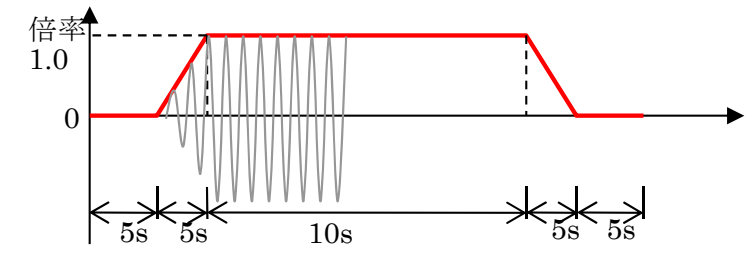


正弦波加振に対し、跳び上がり量はばらつく

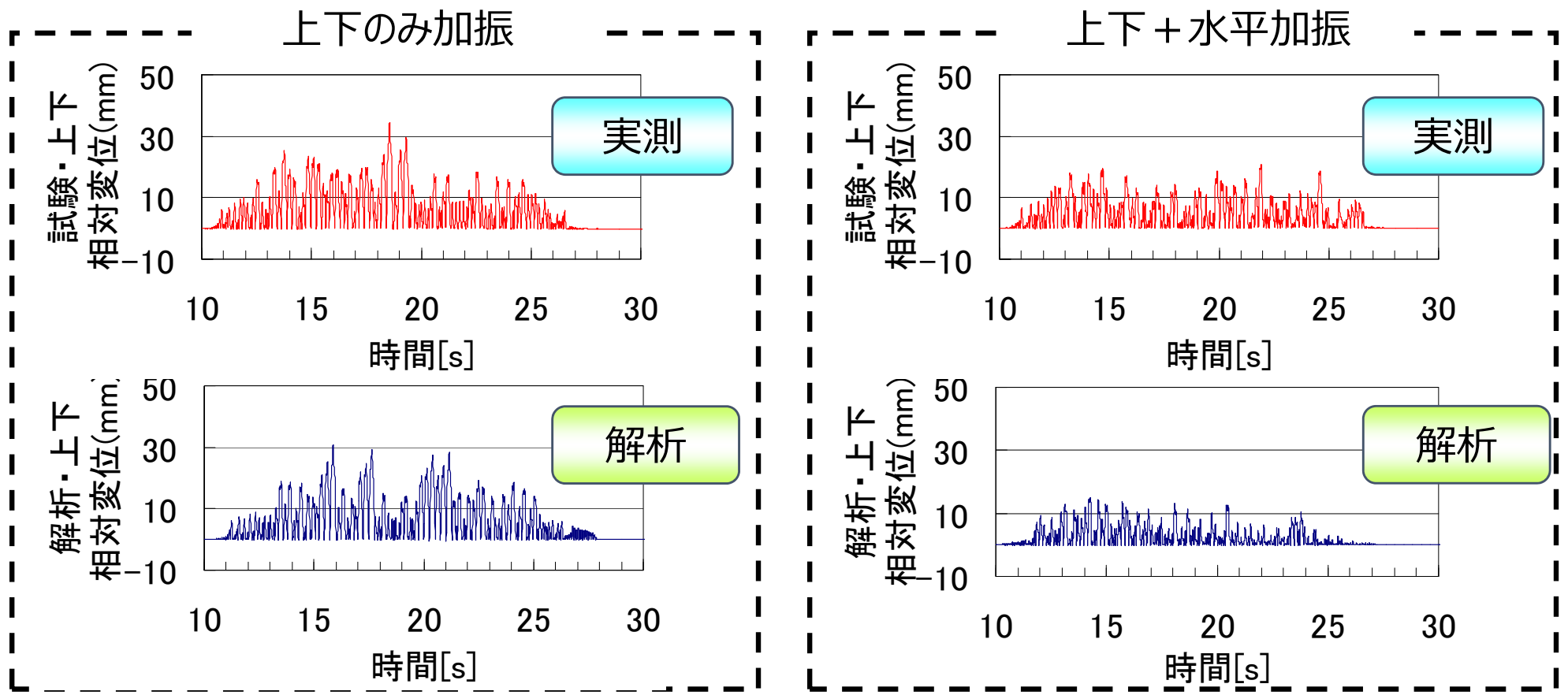
3. 実寸単体試験【水平加振の跳び上がりへの影響】

加振波：正弦波
 雰囲気：水中(流体力100%)
 加振方向：上下のみ加振
 水平+上下加振

(水平) 加振レベル：3.9m/s²
 加振振動数：4.2Hz
 (上下) 加振レベル：19.6m/s²
 加振振動数：11.9Hz



正弦波加振波形

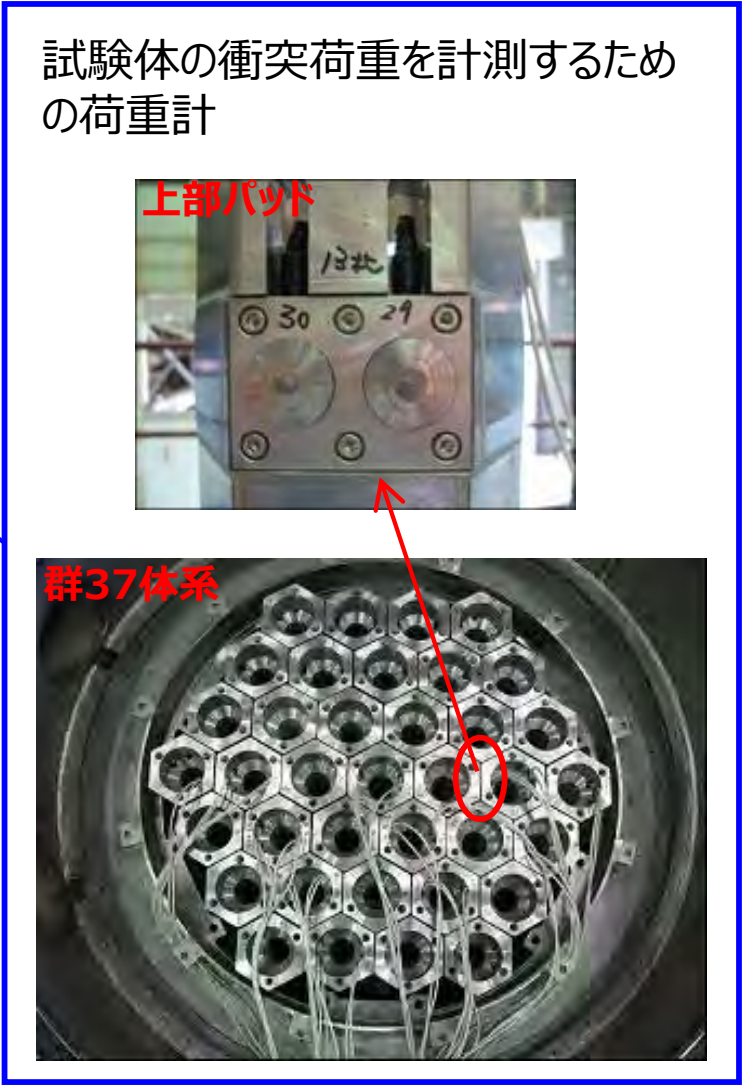
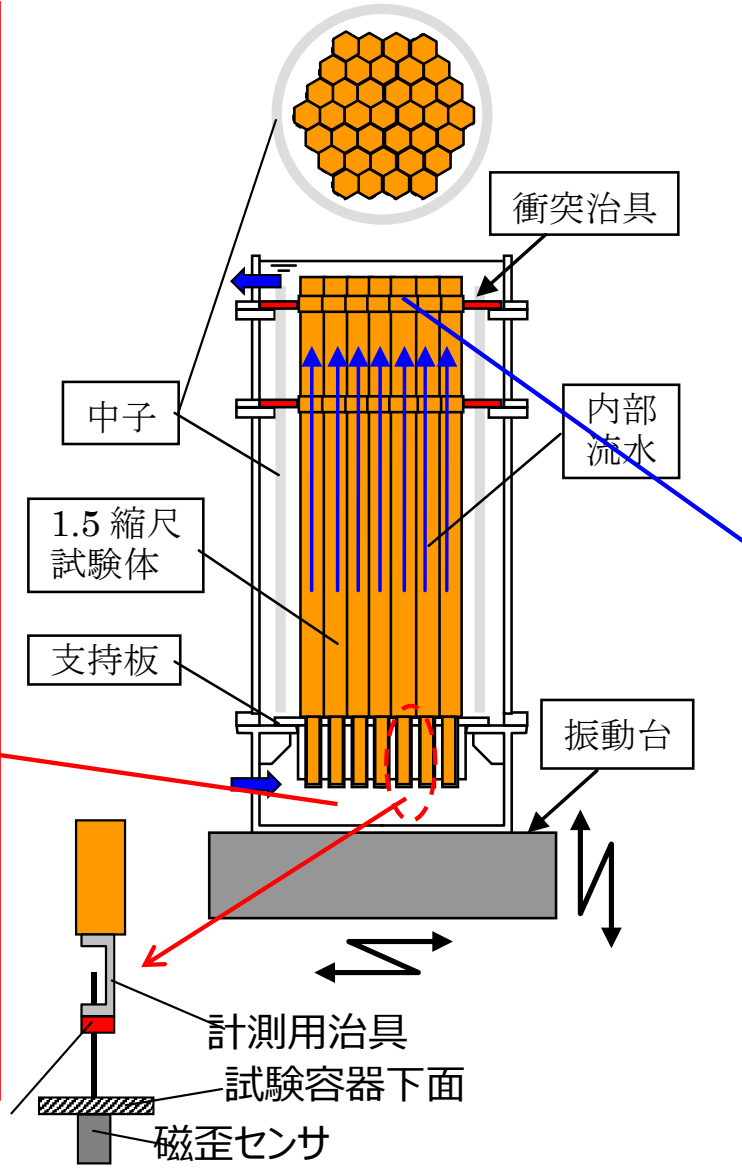
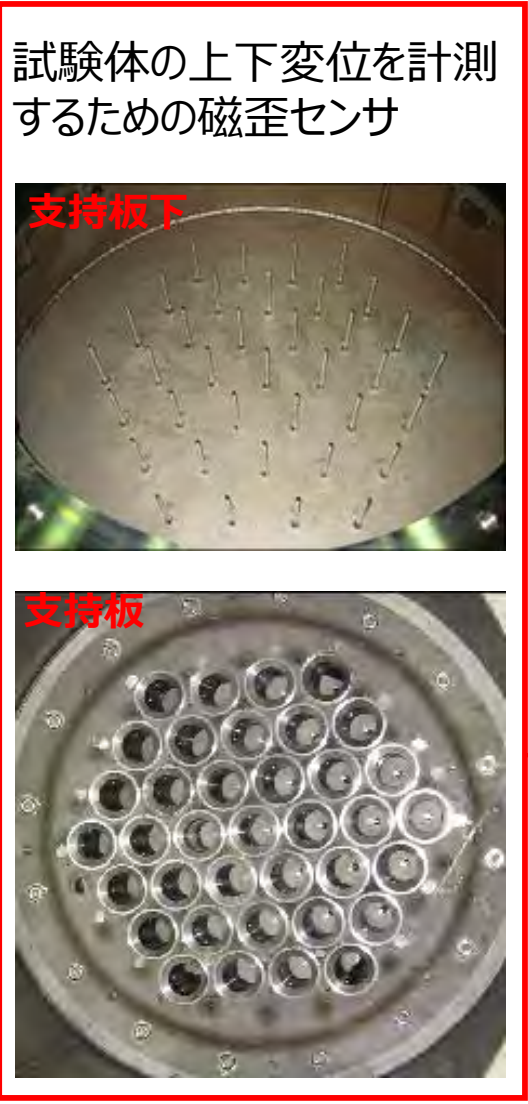


水平加振の影響で跳び上がり量が小さくなる傾向を解析で再現

4. 37体群体系試験【試験装置の概要】

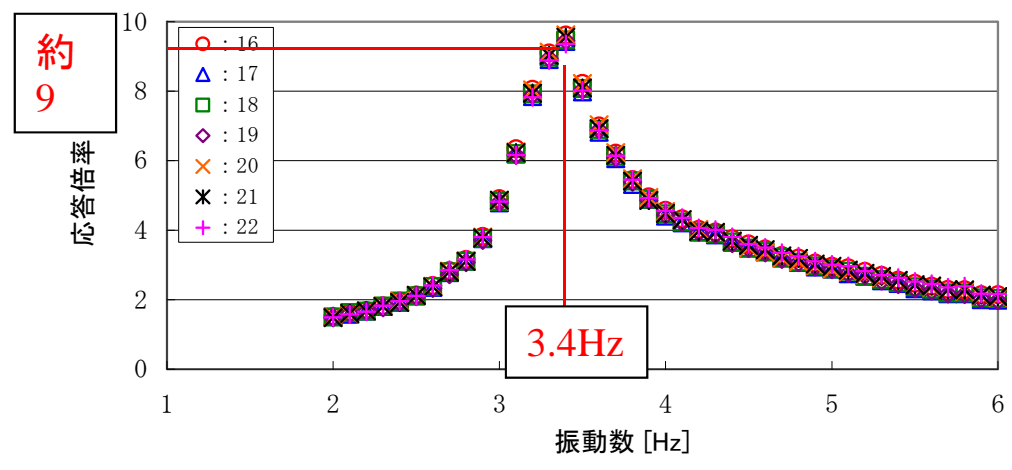
計測概要

主な計測項目：燃料集合体の跳び上がり量（上下変位）、上部パッドにおける衝突荷重

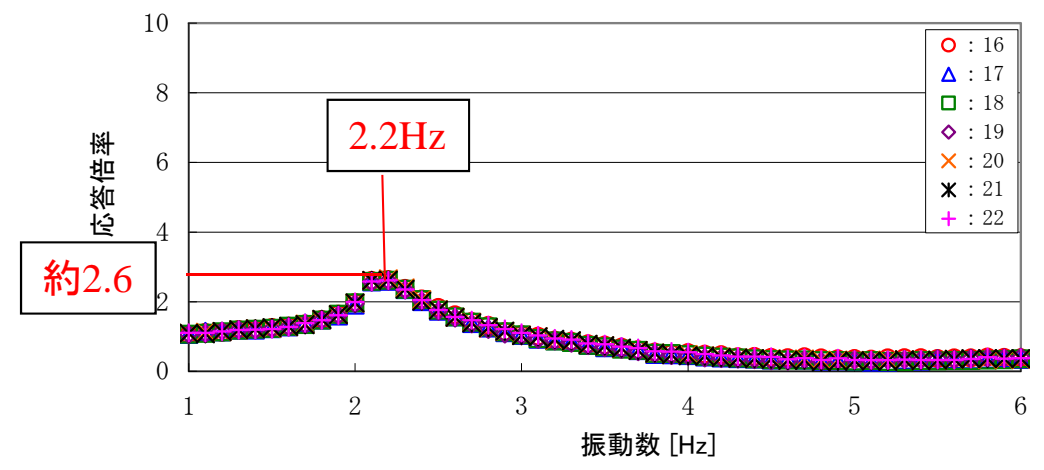


4. 37体群体系試験【スイープ加振試験結果（加振方向の影響）】

水平加振25Gal (X方向・Y方向)

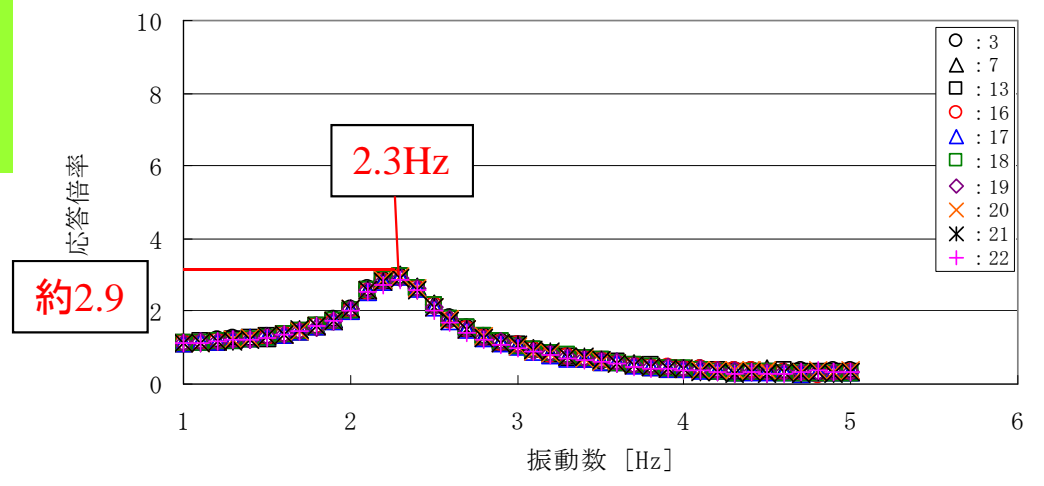
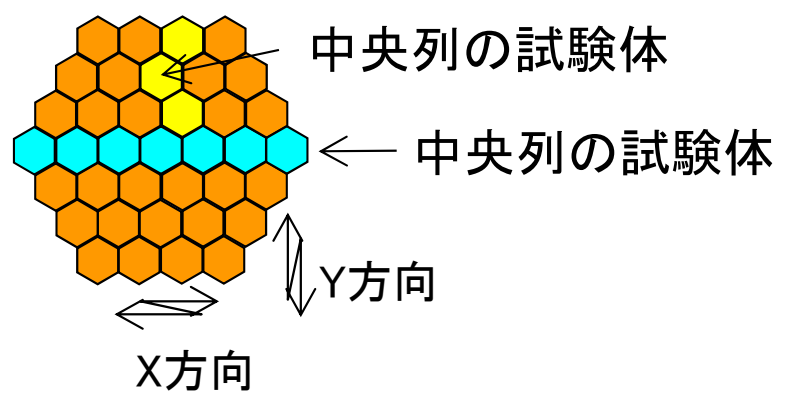


(a) 気中 X方向



(b) 水中X方向

- ・水中における共振振動数が35%程度低下
- ・流路網流体付加質量の影響を確認



(c) 水中Y方向

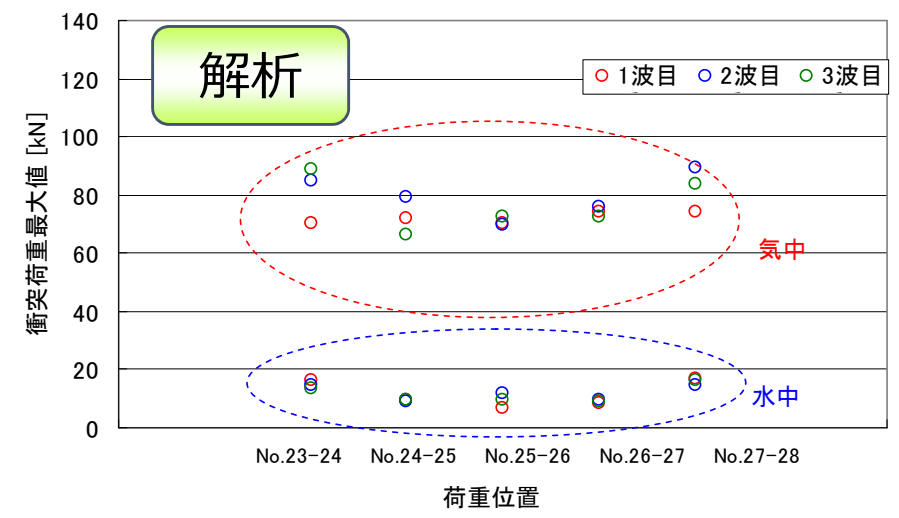
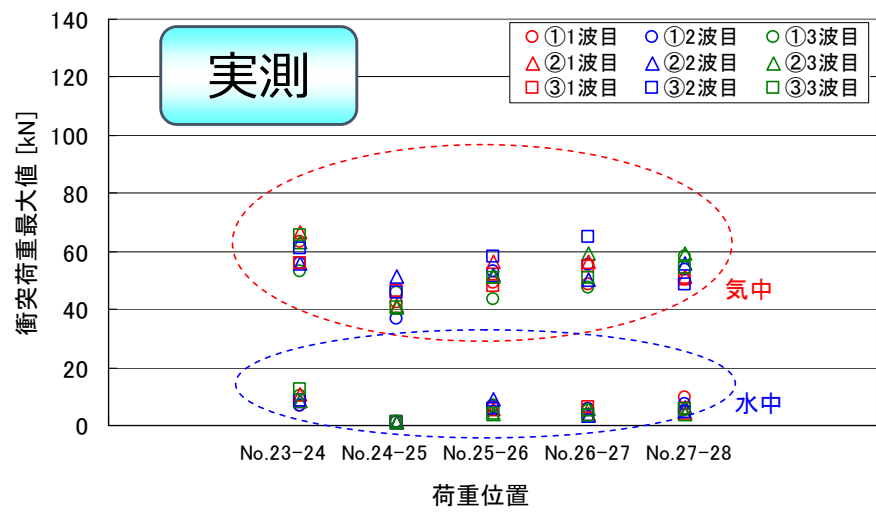
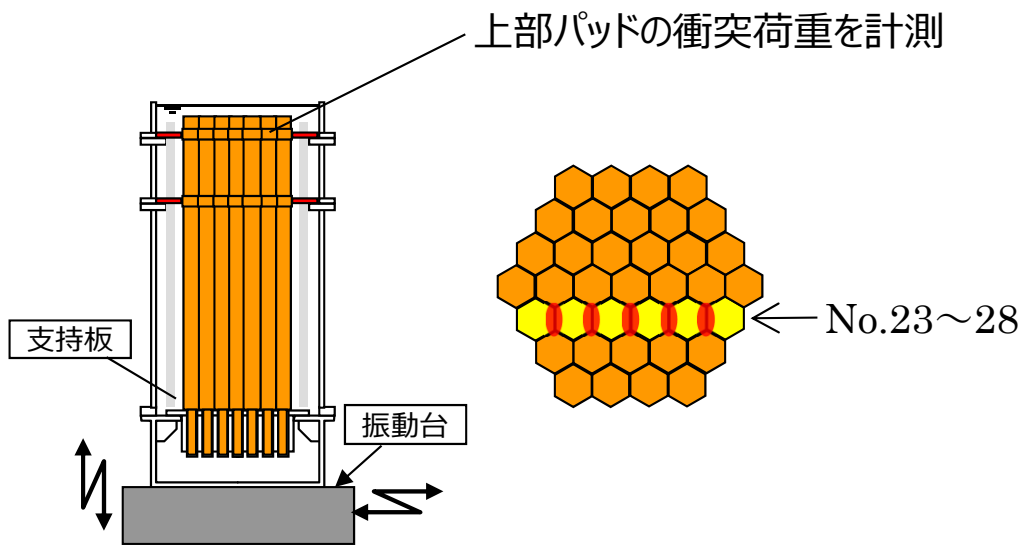
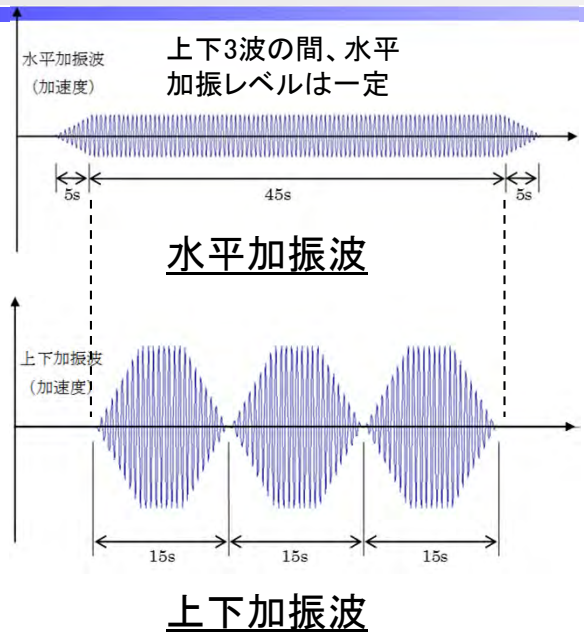
X方向とY方向の加振における共振振動数、応答倍率ともに差は小さい。

4. 37体群体系試験【衝突荷重 最大値比較】

水平 + 上下
正弦波加振

水平: 3.9m/s^2
5.1Hz

上下: 14.7m/s^2
14.6Hz

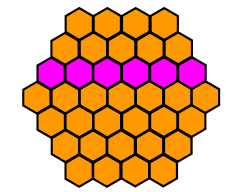


- ・解析の最大衝突荷重は、実測を良く模擬できている。
- ・気中と比較して水中の場合、流路網の影響により衝突荷重が小さくなる。

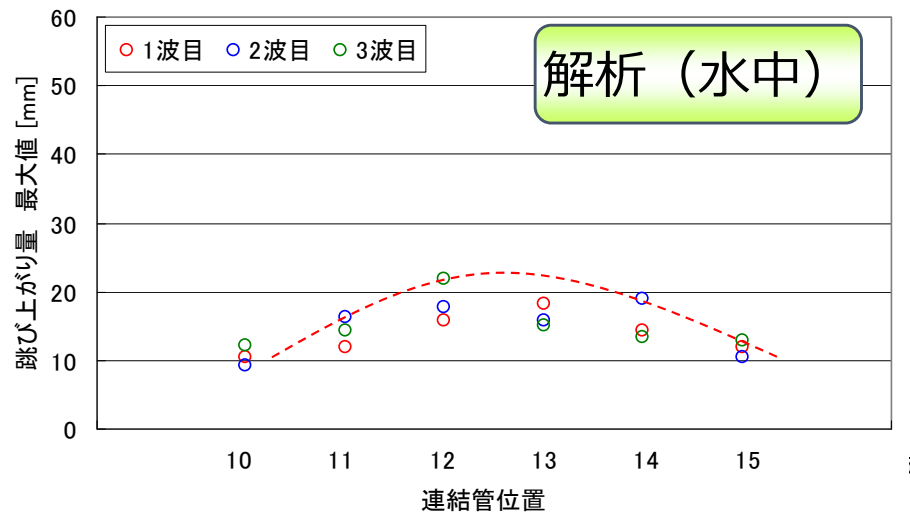
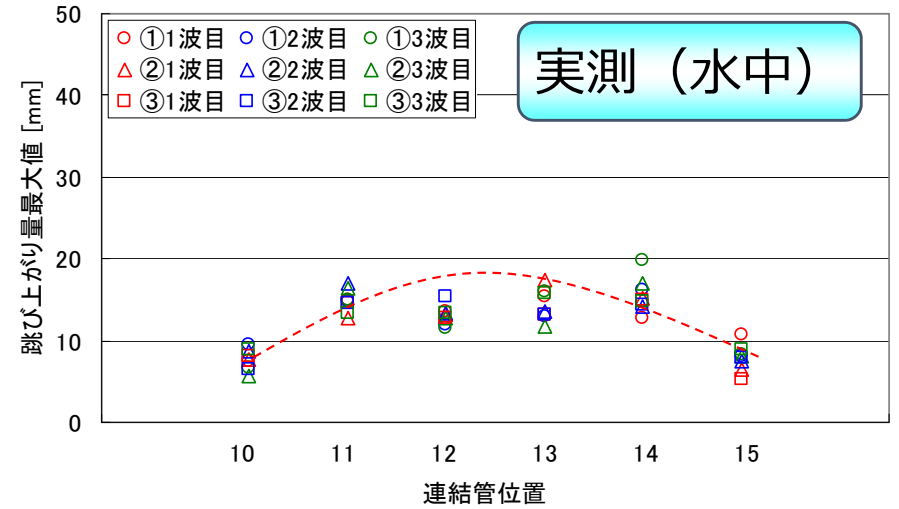
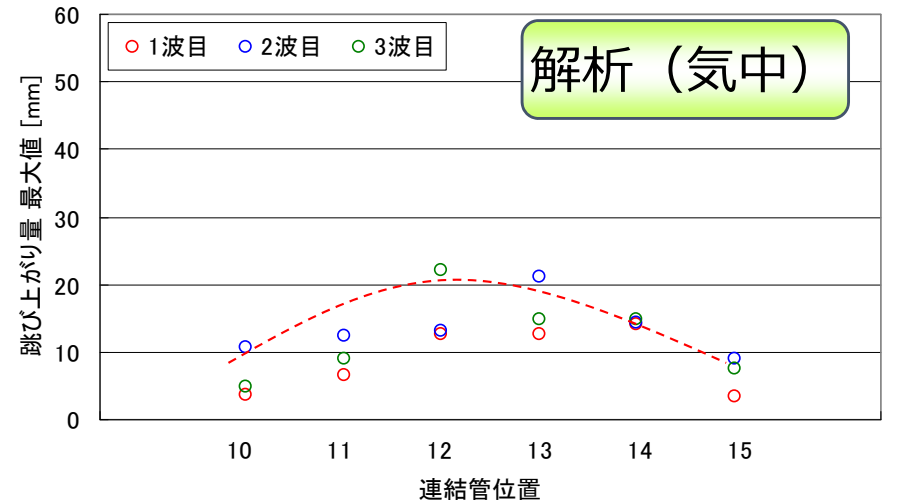
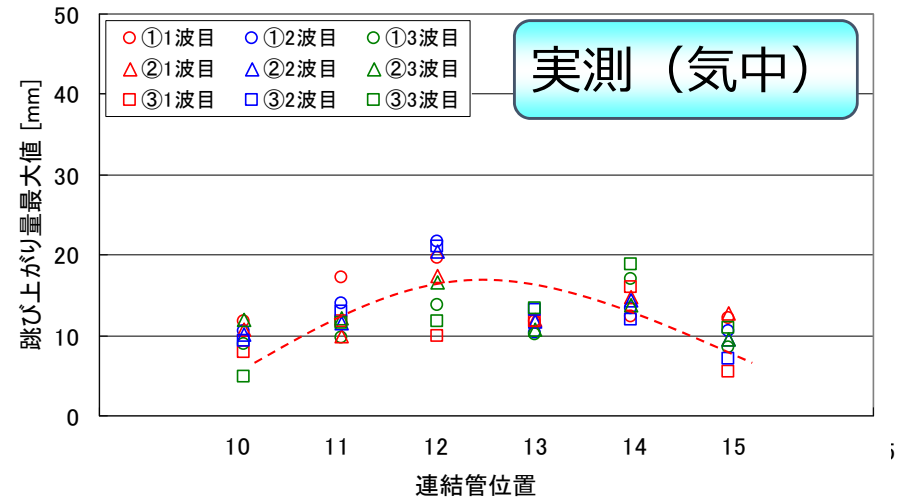
4. 37体群体系試験 【雰囲気と最大跳び上がり量】

水平 + 上下 正弦波加振

水平: 3.9m/s^2 5.1Hz
 上下: 14.7m/s^2 14.6Hz

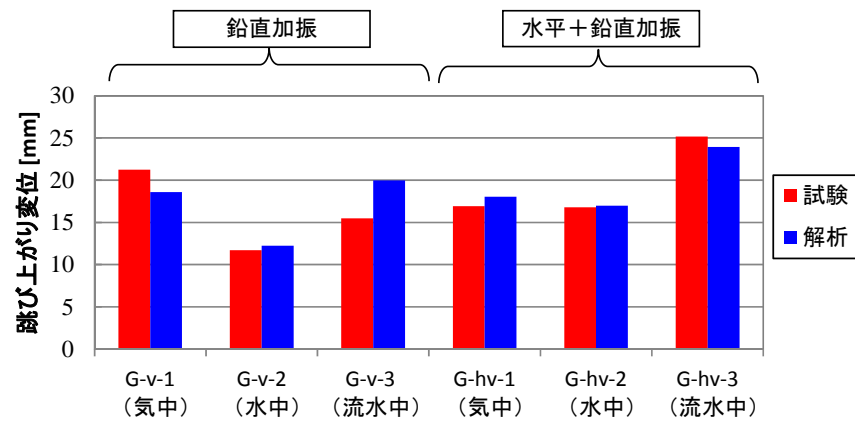


← No.10~15

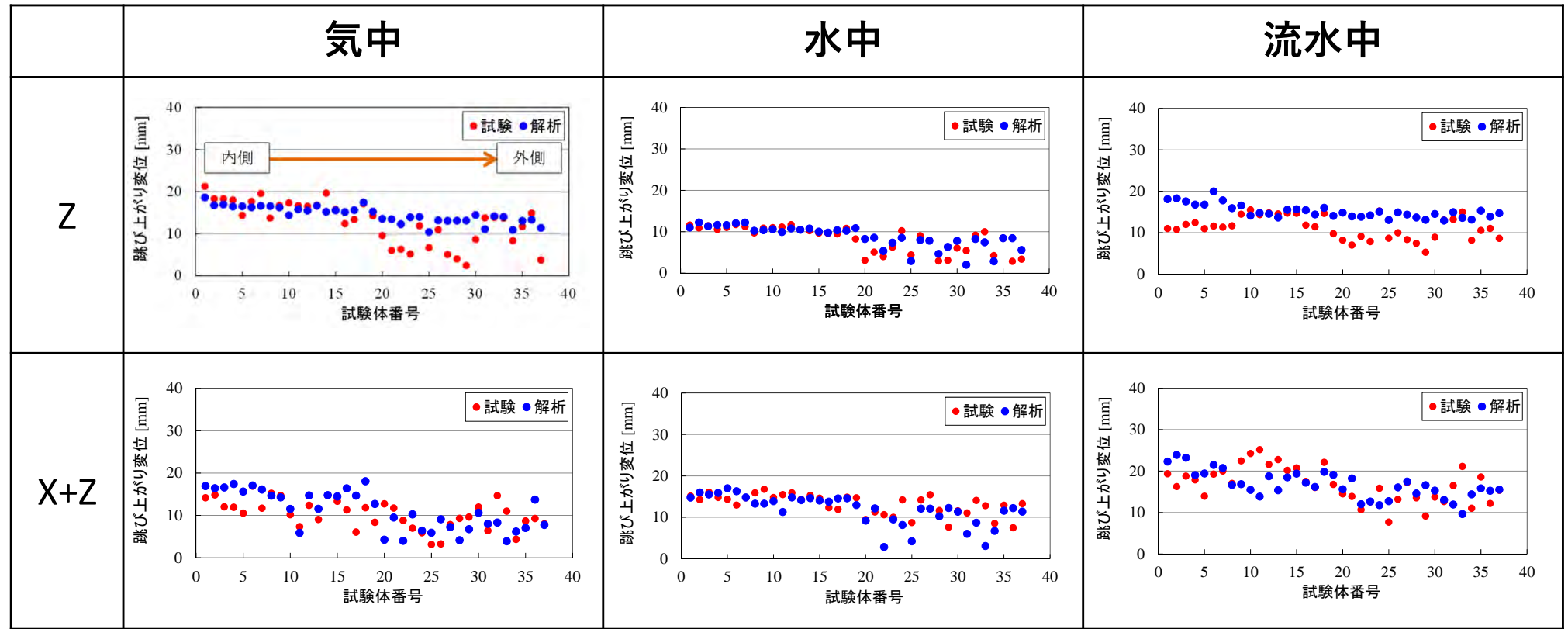


・跳び上がり量は、気中と水中で（衝突荷重ほど）明確な差異は生じない。

4. 37体群体系試験【雰囲気、加振方向と最大跳び上がり量】



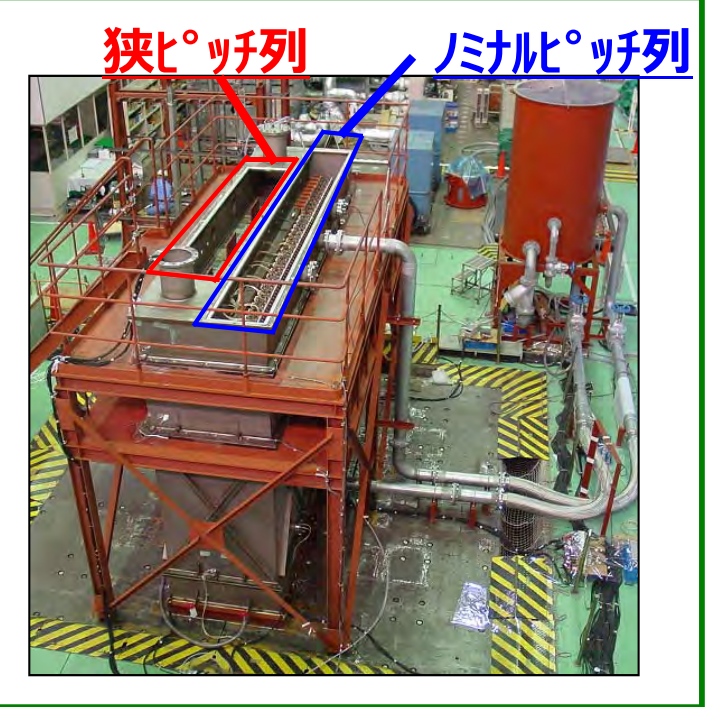
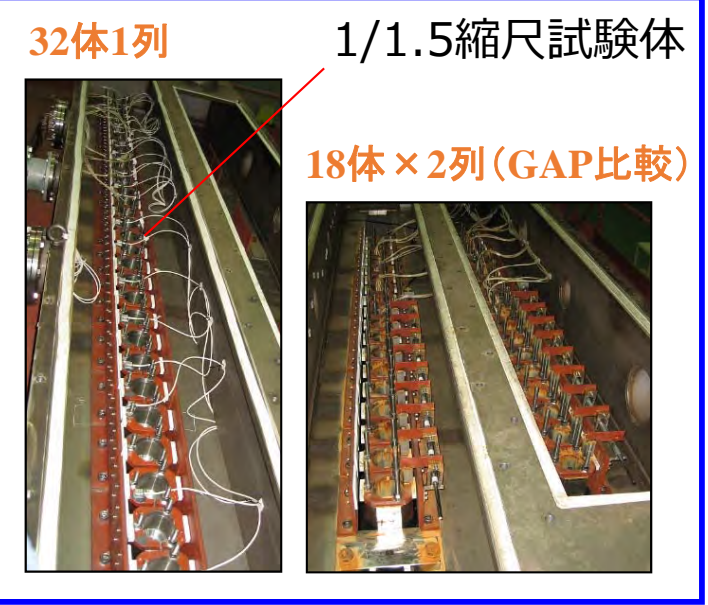
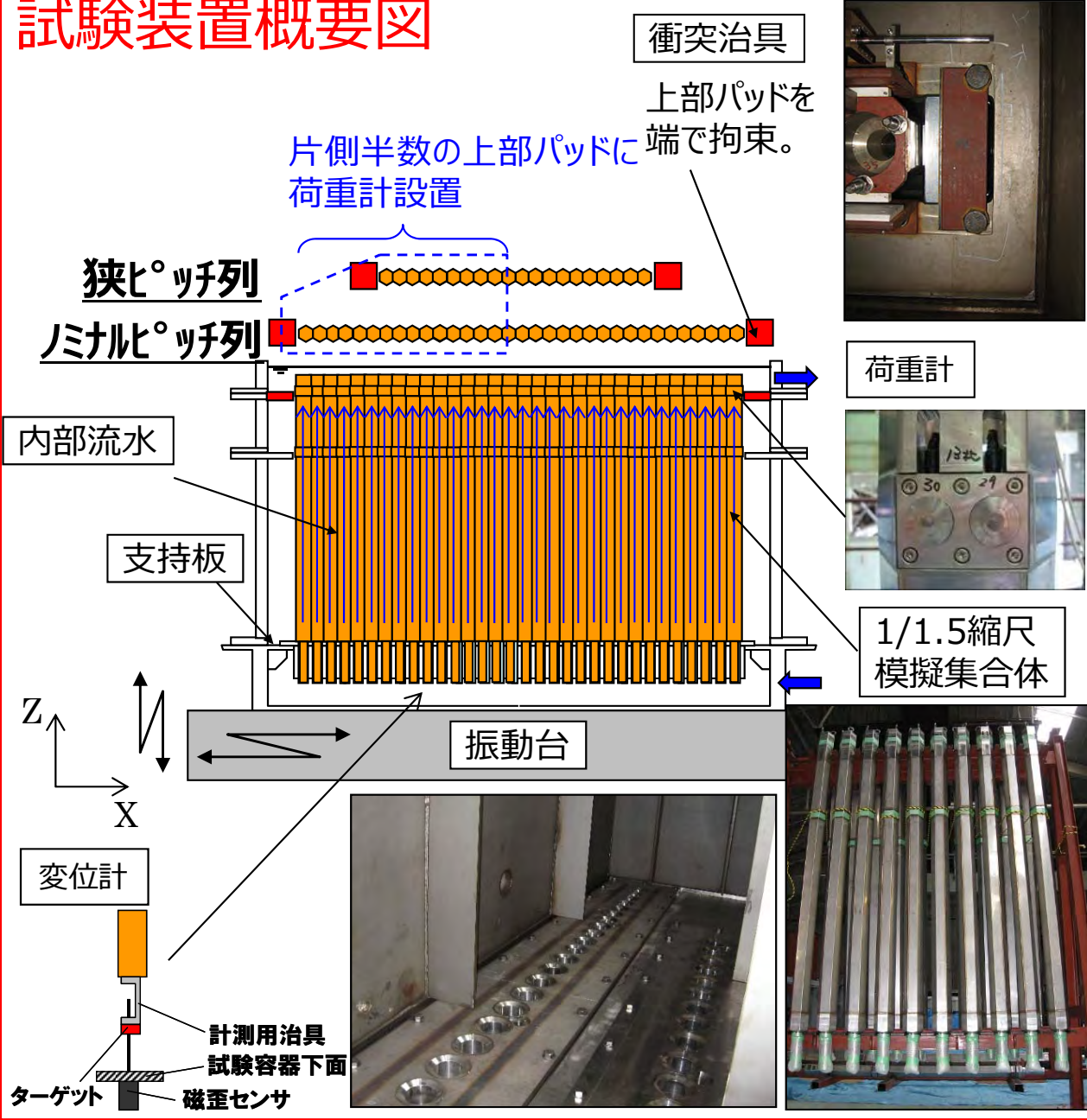
全体的な傾向は一致



内部流体の影響で跳び上がりは増加

4. 列体系試験【試験装置の概要】

試験装置概要図



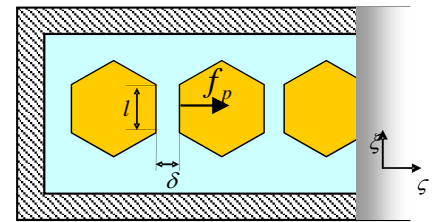
流路圧力

- 内部流体は非圧縮、非粘性の完全流体
- 流体の上下方向の流れによる影響は小さいと考える
- 流路網間の隙間はどこも均等であり、微小変形による流路網の隙間の変化は無視できると考える。
- 流路外の圧力は一定値と仮定

オイラーの運動方程式が成り立つ

$$-\frac{1}{\rho_L} \frac{\partial p}{\partial \xi} = \frac{dv}{dt}$$

ρ_L : 液体密度
 p : 液体圧力
 v : 流速
 (ξ, ζ) : 流路における直角座標系

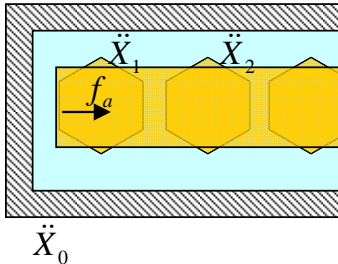


$$f_p = \int_0^l p d\xi = \frac{l}{2} (p|_{\xi=0} + p|_{\xi=l}) - \frac{\rho_L l^3}{12\delta} \ddot{\delta}$$

$$f_p = -\frac{\rho_L l^3}{12\delta} \ddot{\delta}$$

付加質量慣性力

- 複数の炉心構成要素が一体で動くことと仮定し、この可動体積を長方形で模擬。
- 炉心構成要素と一緒に振動する水の慣性力は容器との相対加速度に応じて発生する。

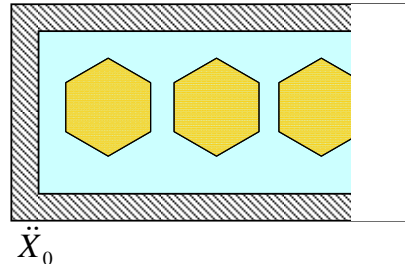


$$f_a = -\frac{m_a}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\ddot{X}_i}{n} - \ddot{X}_0 \right)$$

$$m_a = \begin{cases} 0.867\pi\rho_l^2 & (n=1) \\ 1.511(n-1)^{0.1689}\pi\rho_l^2 & (n \geq 2) \end{cases}$$

排除質量慣性力

- 容器（流体全体）が動くことによる慣性力は、容器の加速度に応じて発生する。

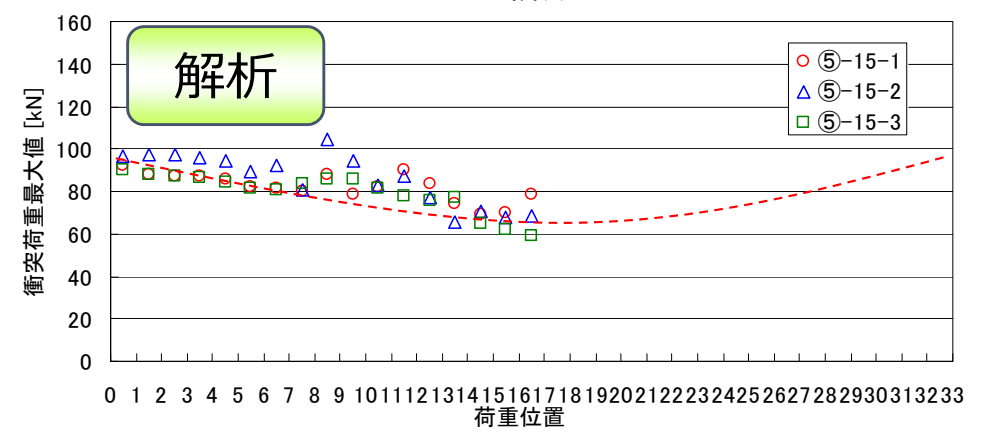
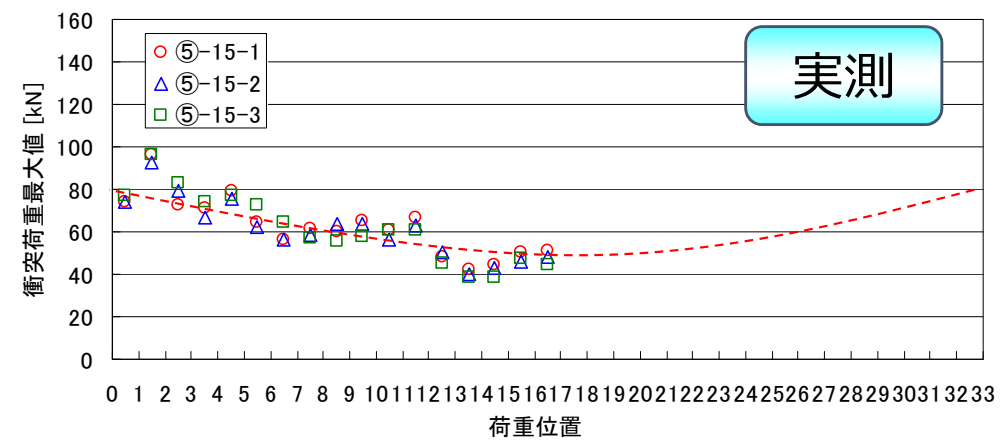
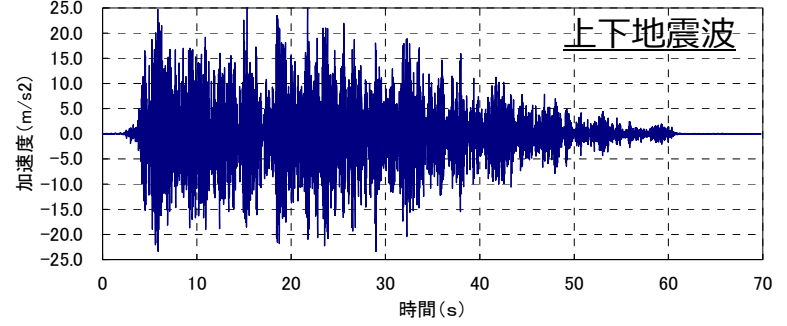
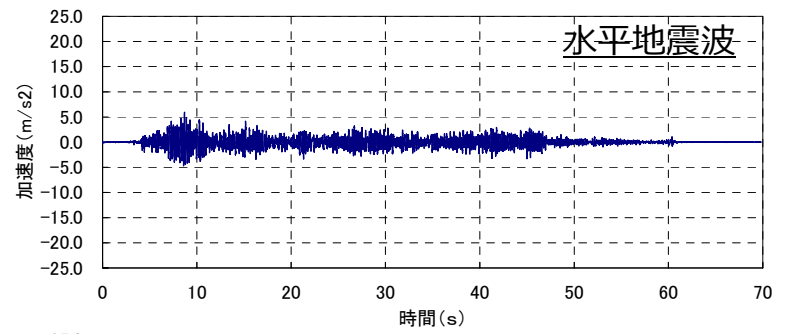
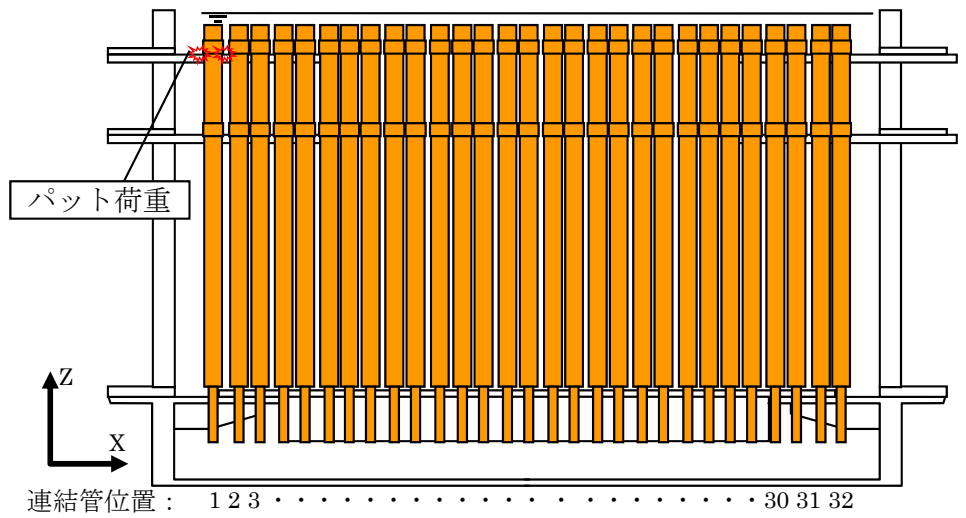


$$f_w = -m_w \ddot{X}_0$$

m_w 炉心構成要素が排除する流体の質量

4. 列体系試験【衝突荷重 最大値比較】

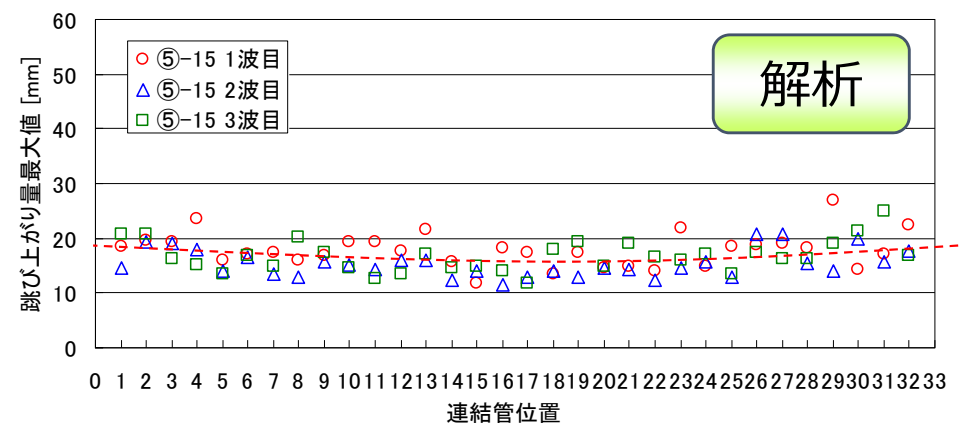
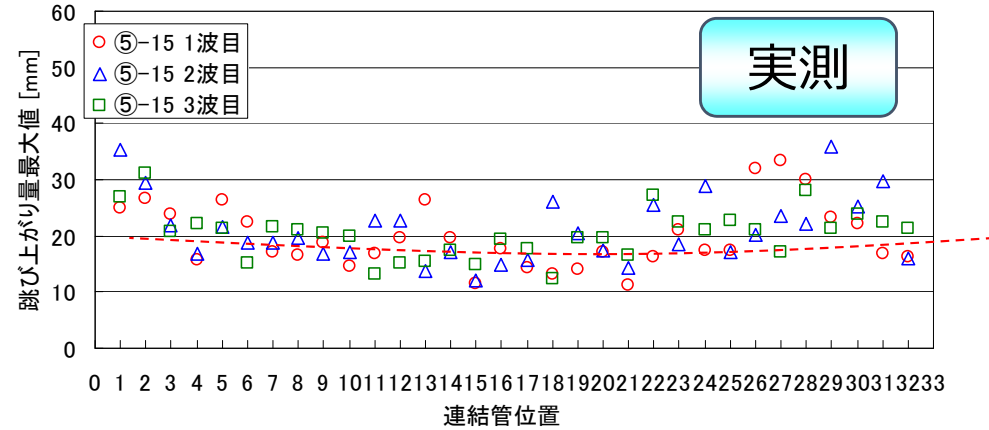
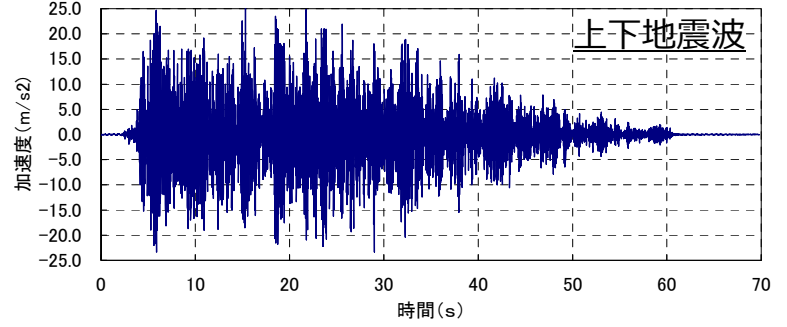
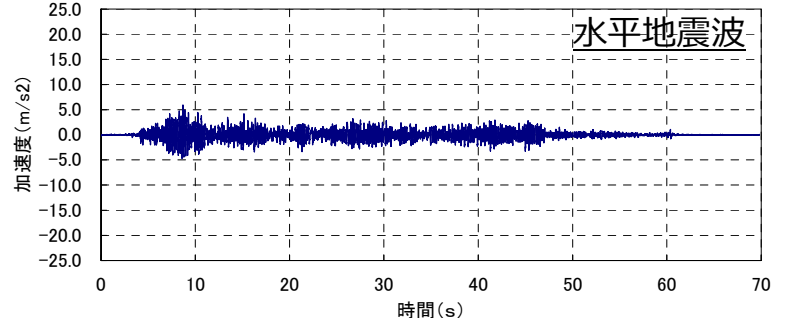
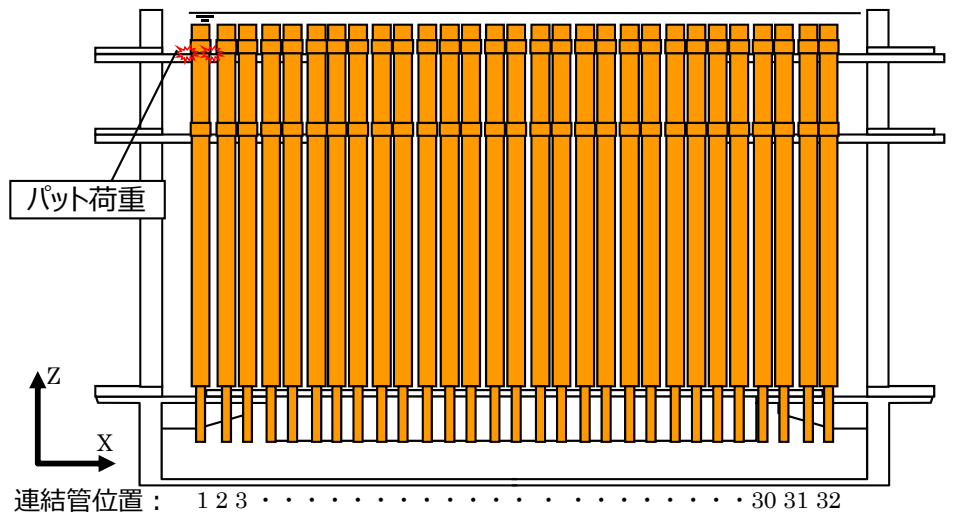
流水中



容器端部に近いほどパット荷重が大きくなる傾向を再現できている。

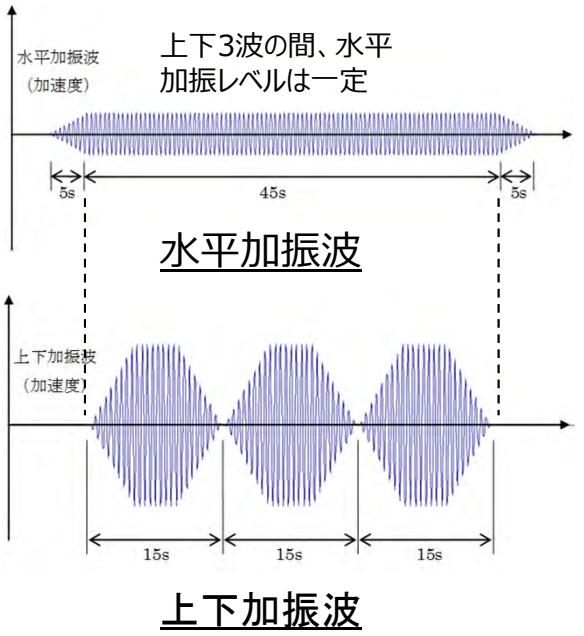
4. 列体系試験【跳び上がり量 最大値比較】

流水中

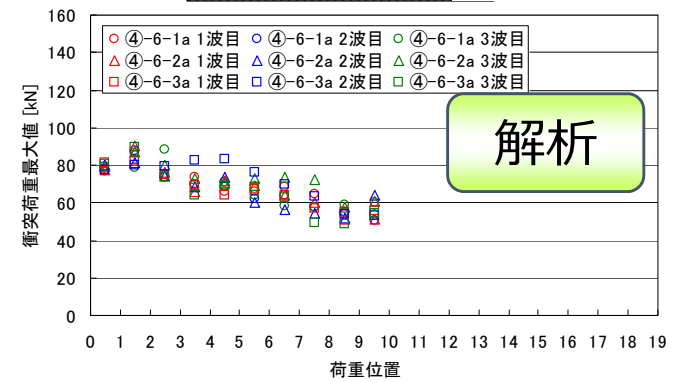
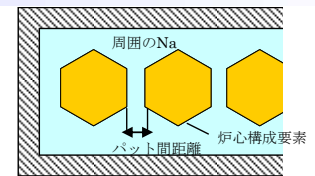
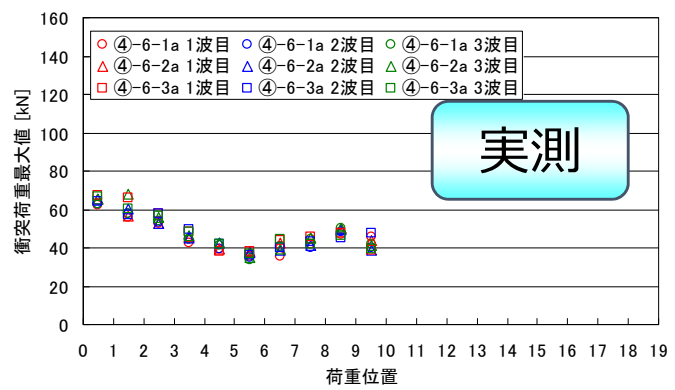


4. 列体系試験【炉心構成要素間 隙間（ギャップ）の影響】

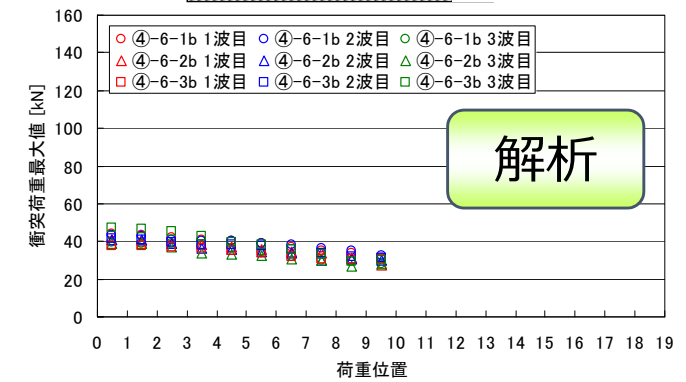
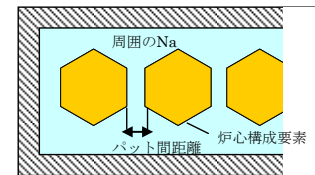
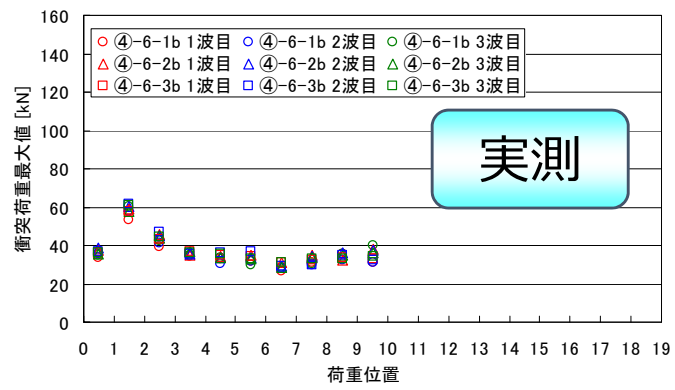
水中
 水平+上下 正
 弦波加振
 水平: 3.9m/s^2
 5.1Hz
 上下: 14.7m/s^2
 14.6Hz



パッド間距離 0.6mm (ノーマル)



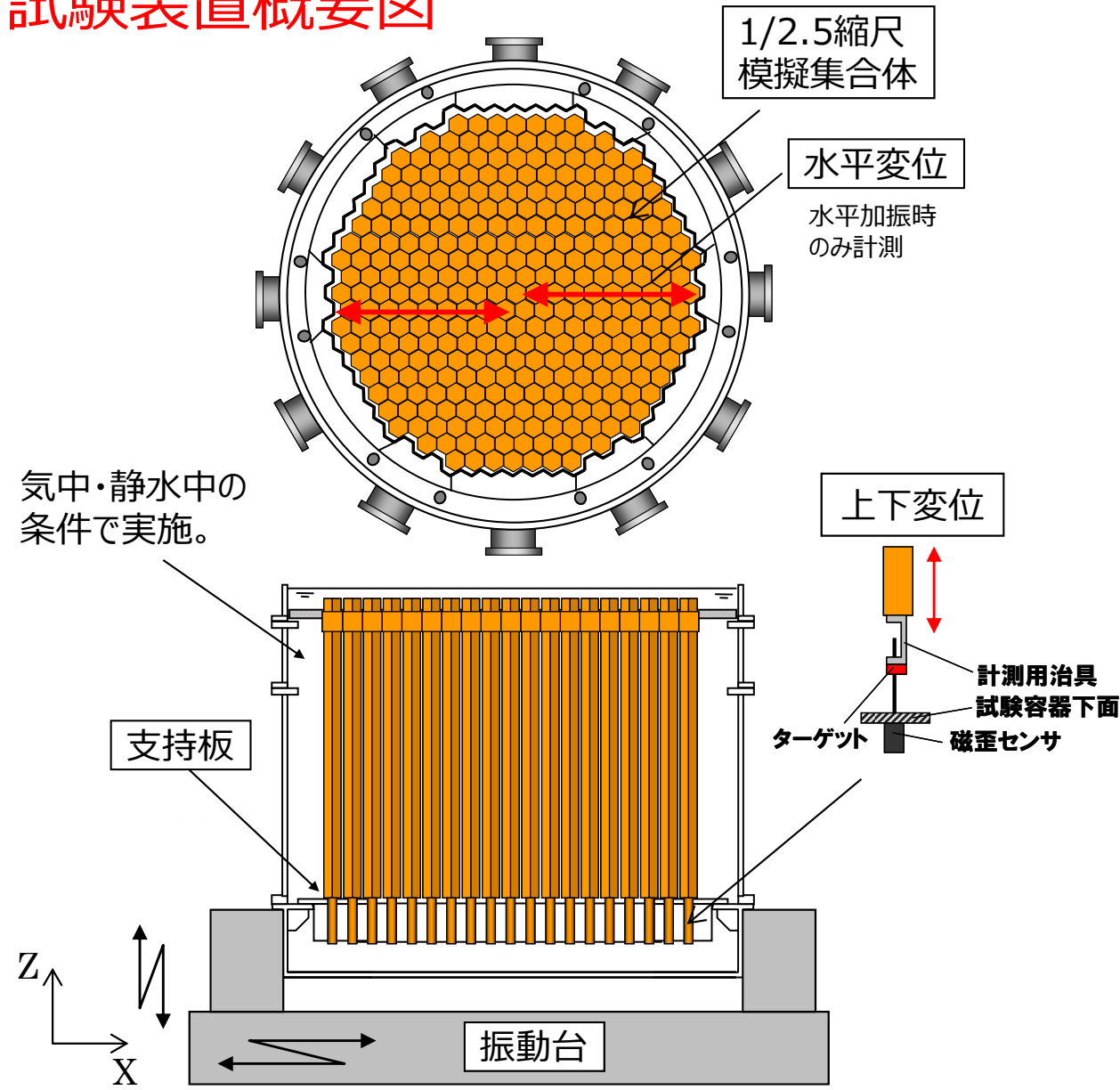
パッド間距離 0.1mm (狭)



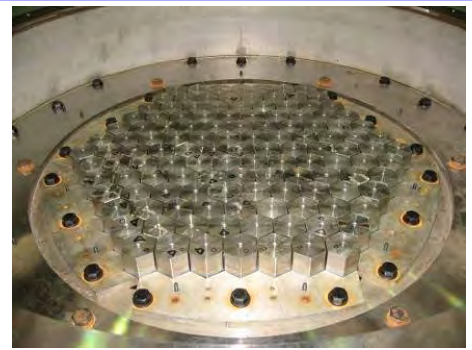
パッド間ギャップが小さくなるとパッド荷重は小さくなることを再現

5. 多数体系試験【試験装置の概要】

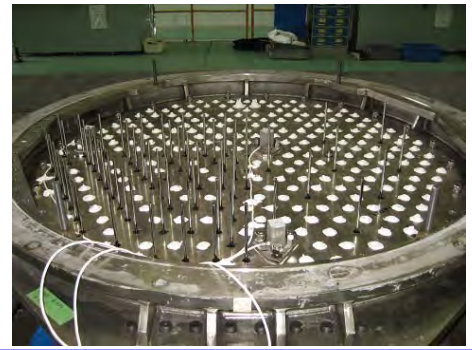
試験装置概要図



127体系



313体系

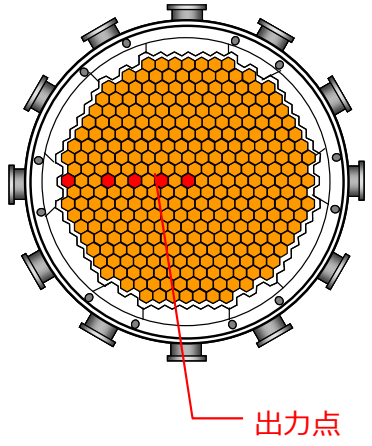


試験装置全体



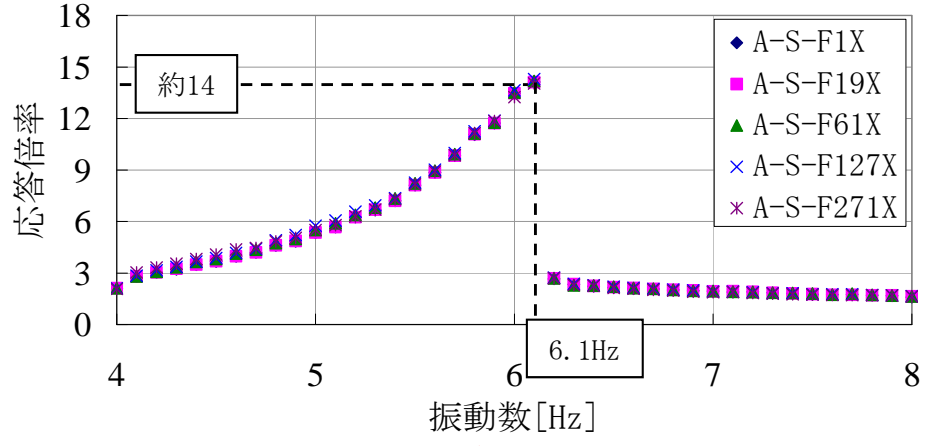
5. 多数体系試験【スイープ加振】

加振波：正弦波挿引加振
 雰囲気：気中、水中
 加振方向：水平加振
 加振レベル：30Gal
 加振振動数：(気中) 4Hz→8Hz
 (水中) 4Hz→6Hz
 体系：127体系、313体系



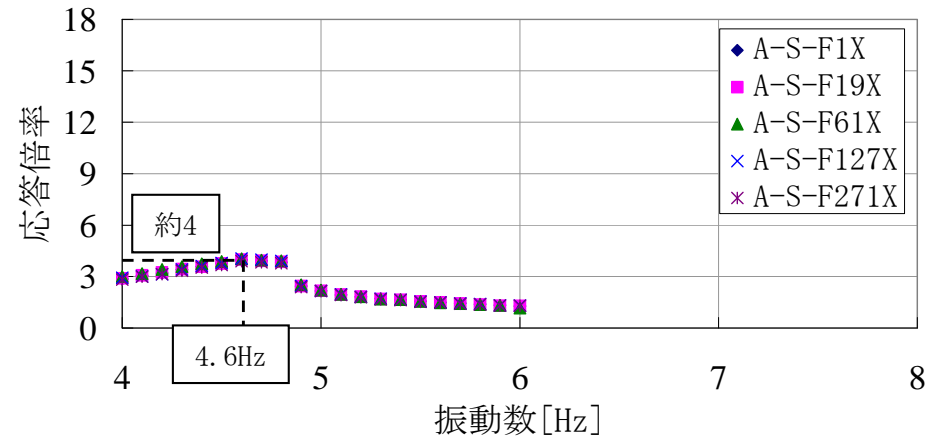
313体系

1、3、5、7、10層目 (90° -270° 断面)



気中

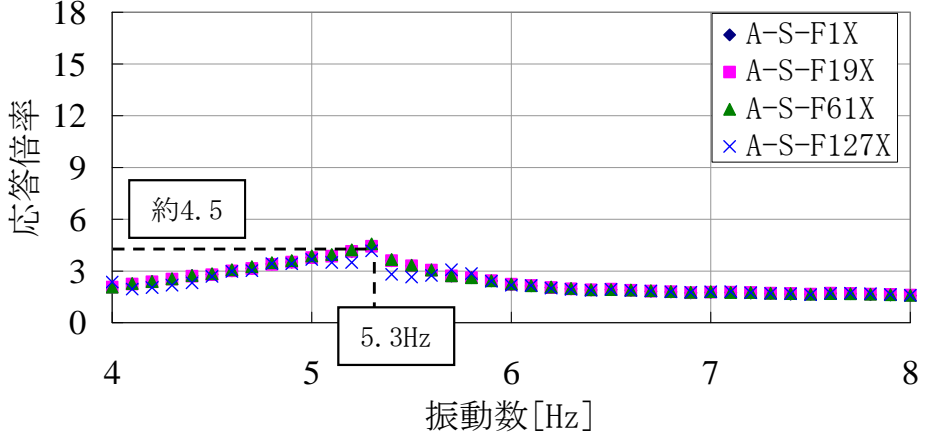
1、3、5、7、10層目 (90° -270° 断面)



水中

127体系

1、3、5、7層目 (90° -270° 断面)

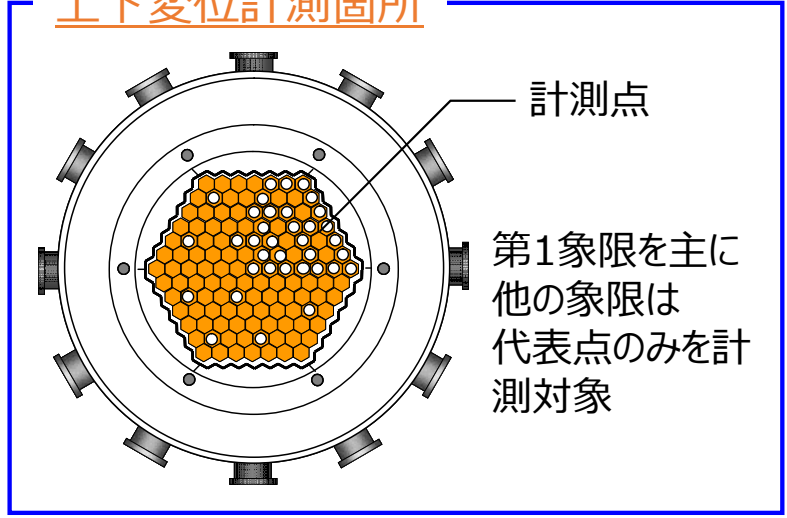


水中

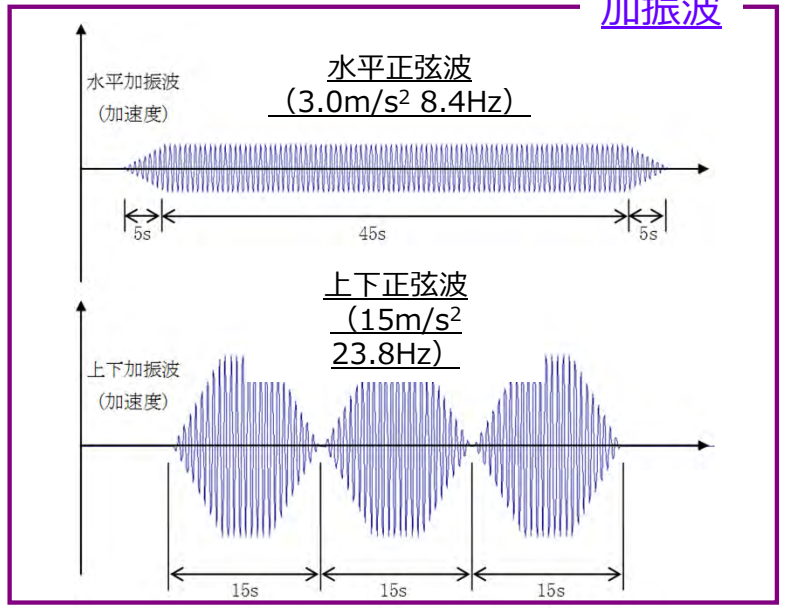
水中では共振振動数が低減し、流路網による流体付加質量が大きくなったことが確認できる。群層数が多いほど、その効果は大きい。

5. 多数体系試験【127体系 気中 水平+上下 正弦波加振試験結果】

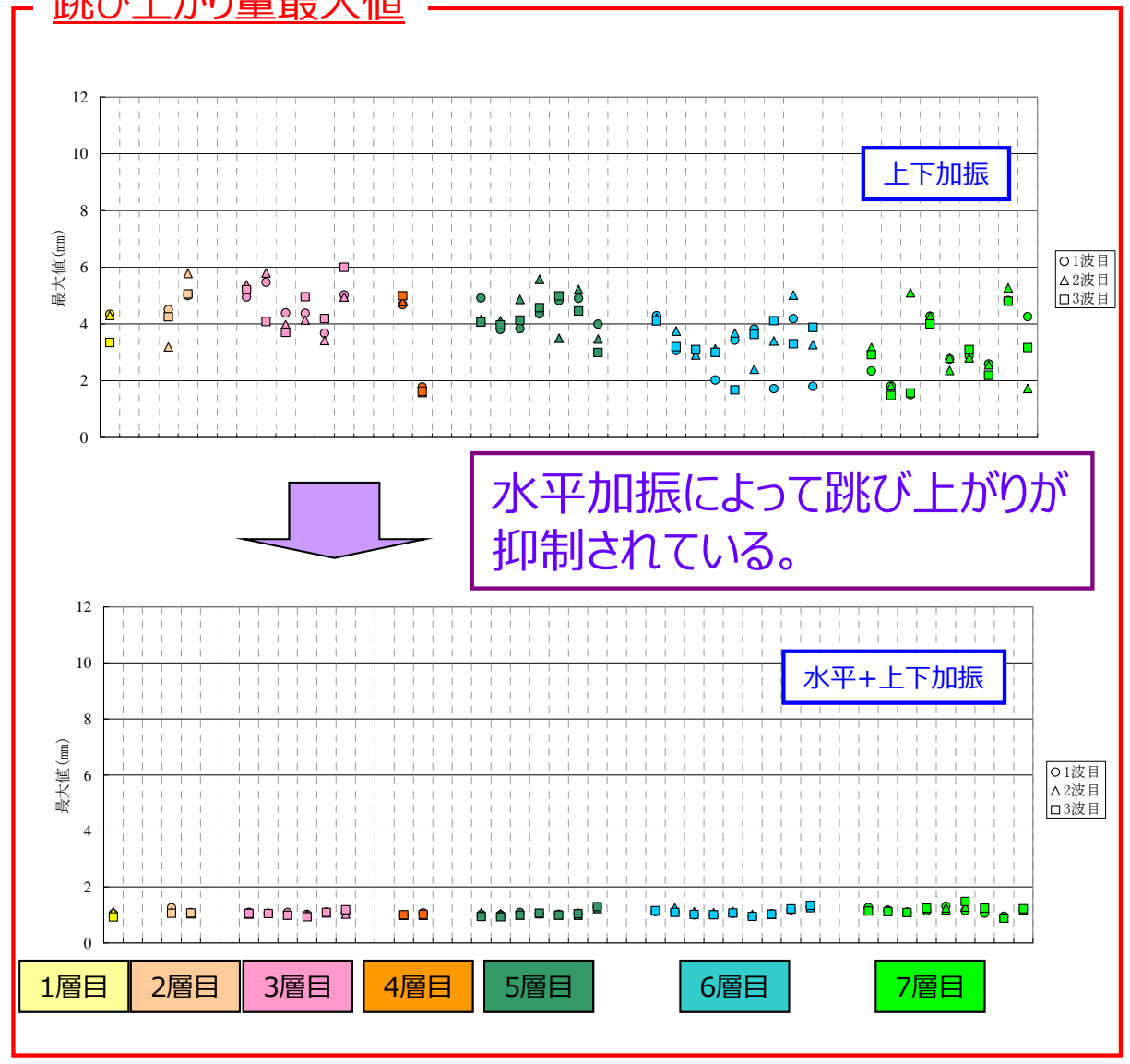
上下変位計測箇所



加振波



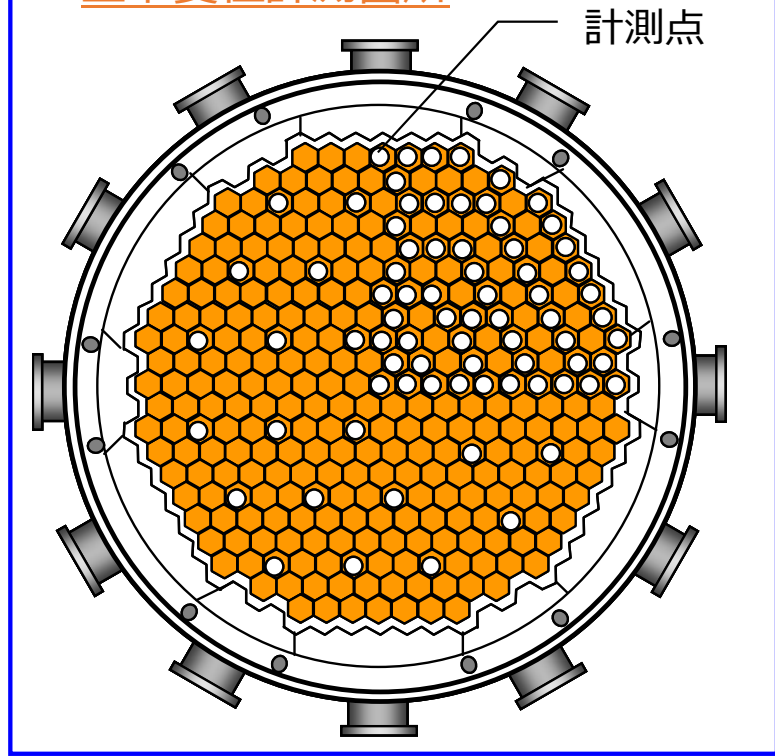
跳び上がり量最大値



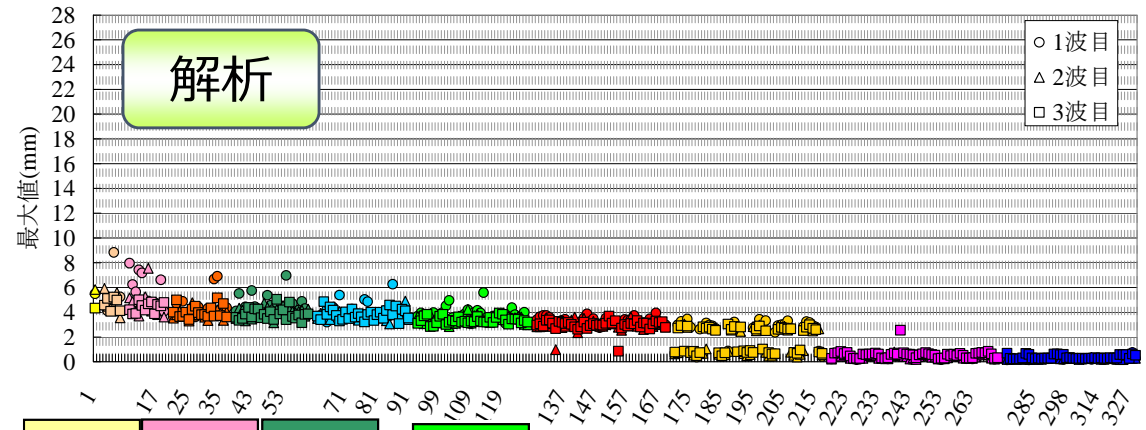
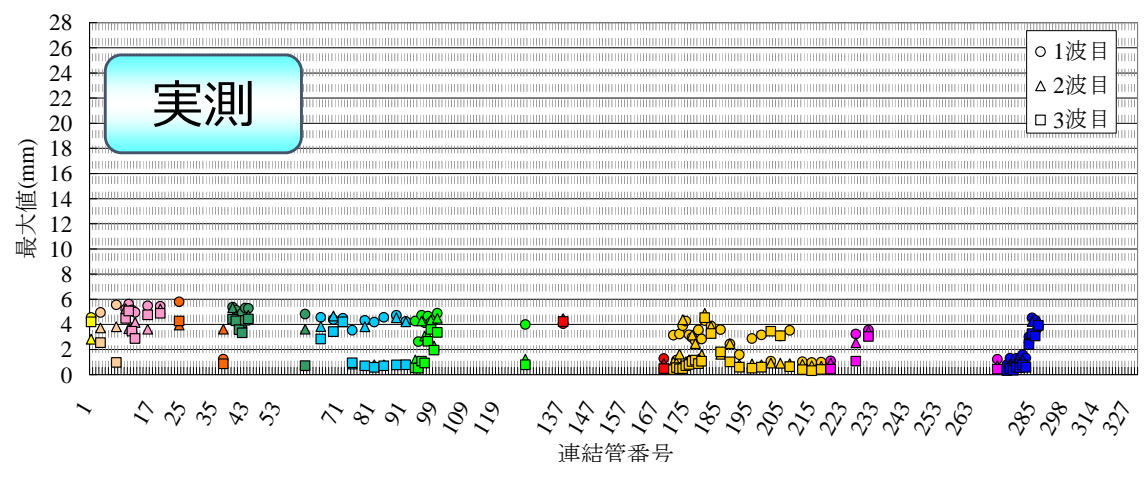
水平加振によって跳び上がりが抑制されることを確認

5. 多数体系試験【水中 正弦波 上下加振】

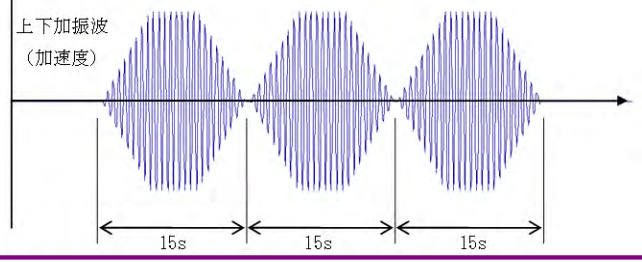
上下変位計測箇所



跳び上がり量最大値



上下正弦波
(15m/s^2 23.8Hz)

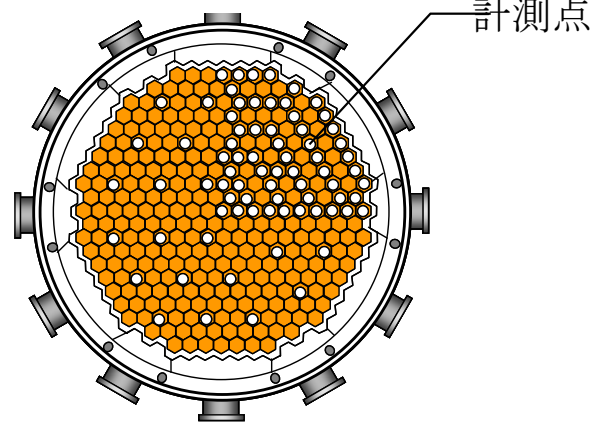


加振波

最大跳び上がり量を再現できていることを確認

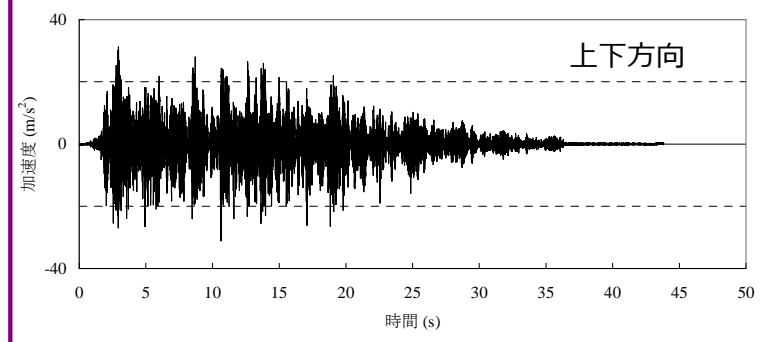
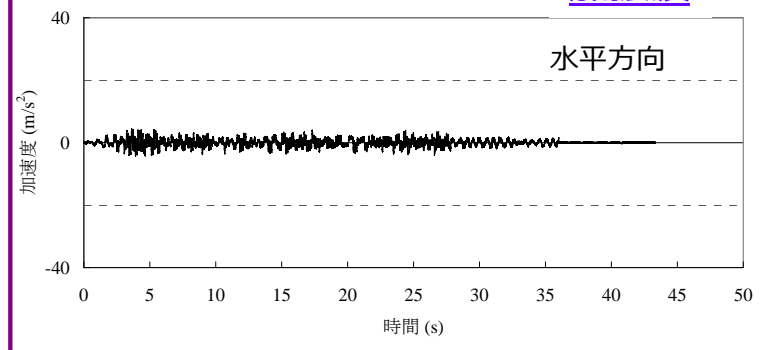
5. 多数体系試験【水中地震波 水平+上下加振】

上下変位計測箇所

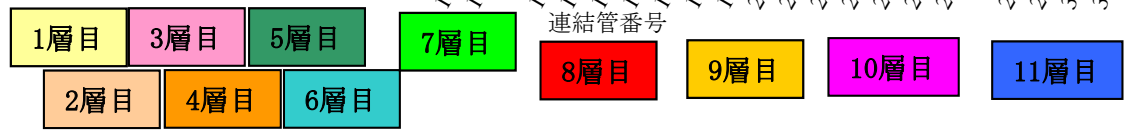
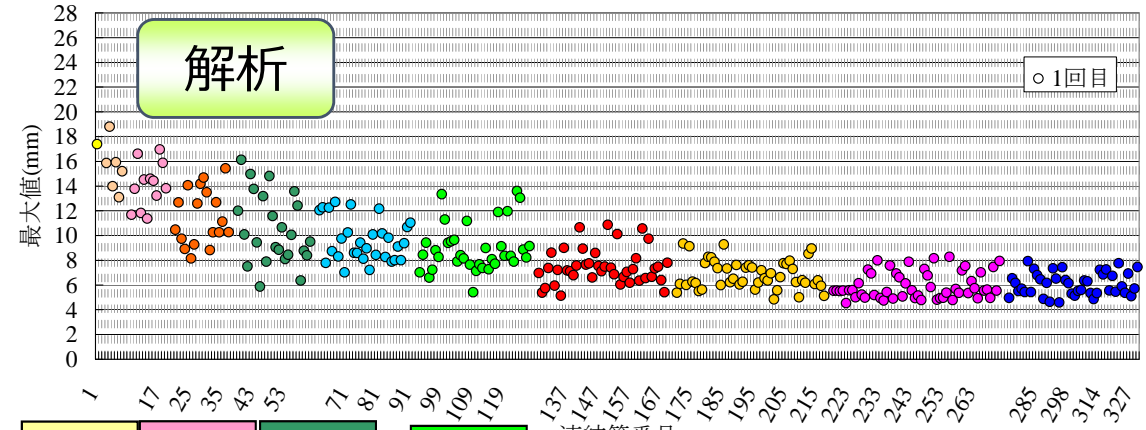
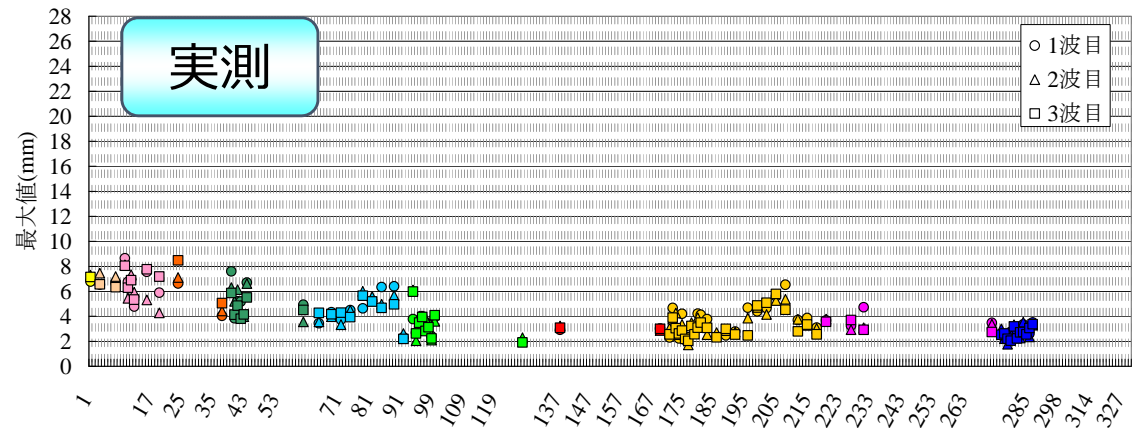


計測点

加振波



跳び上がり量最大値



支持板の応答の影響により、支持板中央の跳び上がり量が大きくなる傾向を再現できることを確認

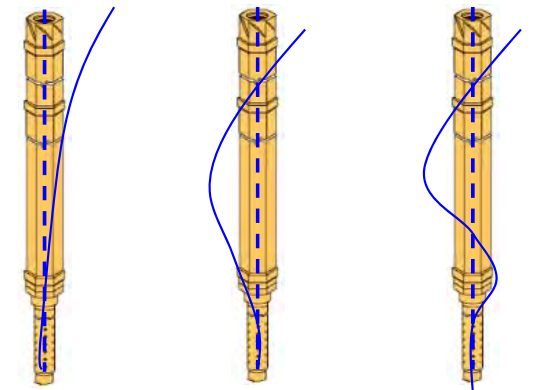
No	コメント
3	炉心構成要素単体及び群振動としての振動モードは、衝突あるいは跳び上がりの有無、フル装荷から部分装荷とすることにより変化すると思われる。これらをどこまで正確に模擬しているのか説明すること。

◎ 応答解析

- ・時刻歴解析により運動方程式を解く
- ・計算効率化のため、モーダル解析手法を取り入れる

◎ 炉心構成要素の応答挙動 = 剛体運動 + 弾性運動

- ・重心の剛体運動のうち、鉛直軸回りの回転運動は拘束とみなす。
 水平：2自由度（並進、回転）×水平2方向=4自由度
 鉛直：1自由度（並進）
- ・弾性運動は、1次～3次までの低振動モードを考慮する。
 水平：梁の1次～3次モード×水平2方向=6自由度



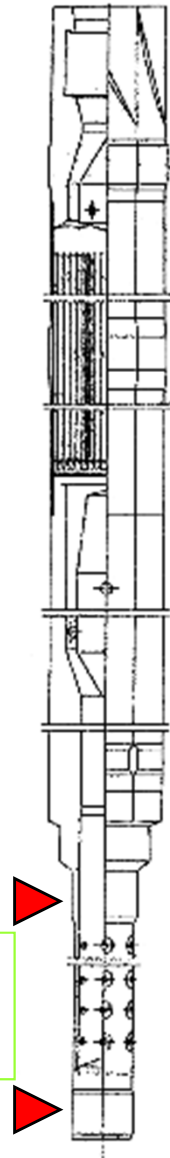
1次～3次の弾性変形を考慮

◎ 固有モードの境界条件

- エントランスノズルの上部及び下部のガタをピン支持でモデル化

◎ 固有振動モードの特徴

- 気中/水中で振動モードは変わる（付加質量を考慮）
- 跳び上がり中でも、2点ピン支持の境界条件は変わらないので、固有モードは影響を受けない。
- 衝突が生じても、その継続時間は高々数msのオーダーであり地震荷重の交番性から衝突の影響は小さいと考え、衝突時でも固有振動モードは変わらないことを前提とする。



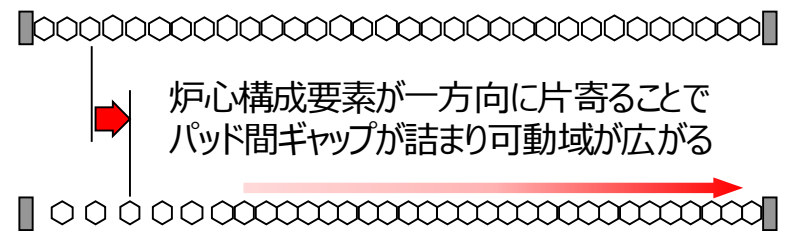
エントランスノズル上
部及び下部
ピン支持でモデル化

No	コメント
4	実験ではX方向単独加振のみであり、衝撃力の計測もX方向しか測定されていない。X、Y同時加振の場合は挙動が複雑になると思われるが、本評価手法は十分確認できるのか、説明すること。

試験及び解析での確認

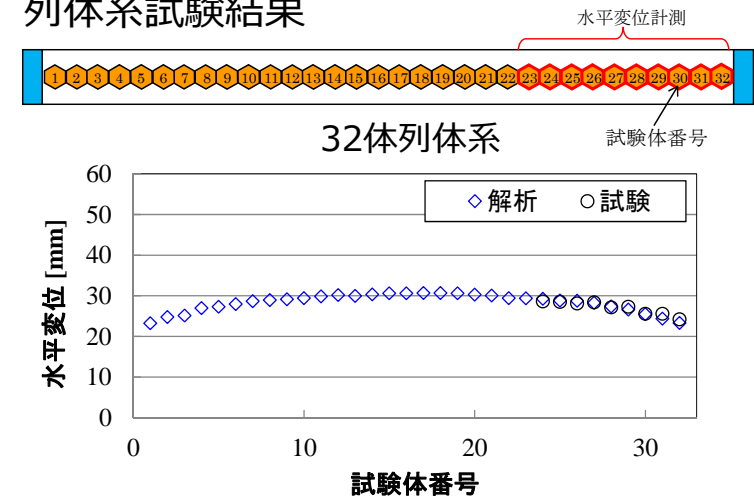
- ◆ 衝突荷重、水平変位は、パッド部ギャップが累積して可動域（トータルギャップ）が増加することにより荷重、変位が増大する効果（列効果）があり、これは最長列で最大となる。このため、最長列方向（X方向）への加振を主体に試験、測定を行っている。
- ◆ X,Y方向の同時加振においても、荷重の発生/水平変位の発生は、最外周部の炉心支持枠に炉心全体が押し付けられることで発生すると考えられる。このため、トータルギャップが最大となる最長列方向による検証で、本評価手法の妥当性は十分確認できている。
- ◆ 合わせて、各試験体系では、加振方向を90°変化させた試験や、衝突荷重の測定は、加振方向に直交する面だけではなく、六角形断面の隣接面にも荷重計を配置し試験も実施していることから、本評価手法で確認可能。

実規模列数による体数増加の影響

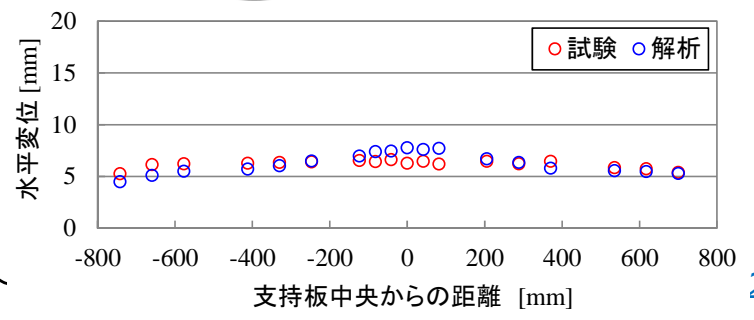
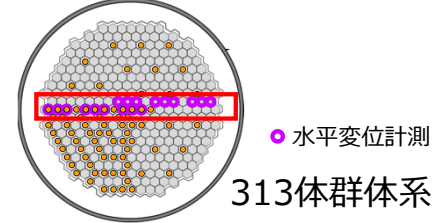


変位(両振幅)は中央が大きく、両端で小さくなる。

列体系試験結果



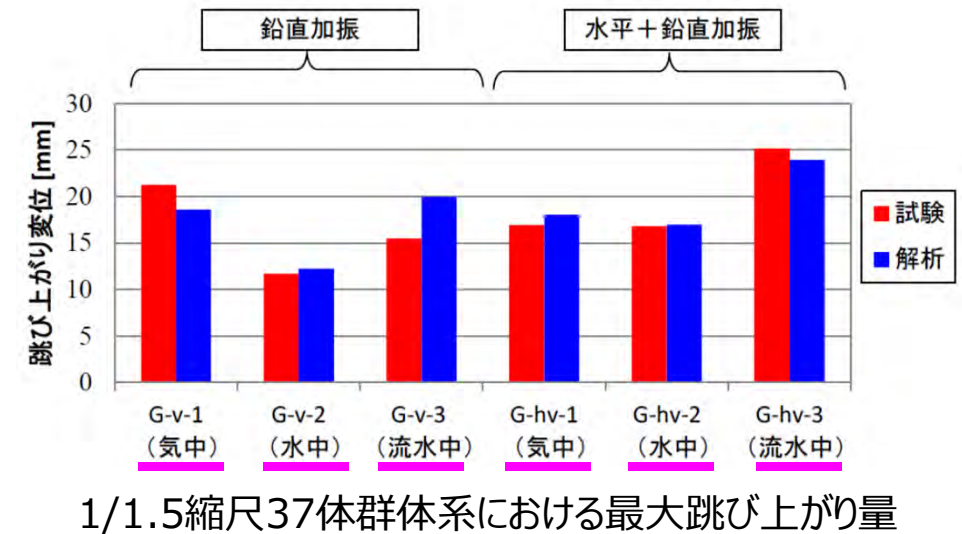
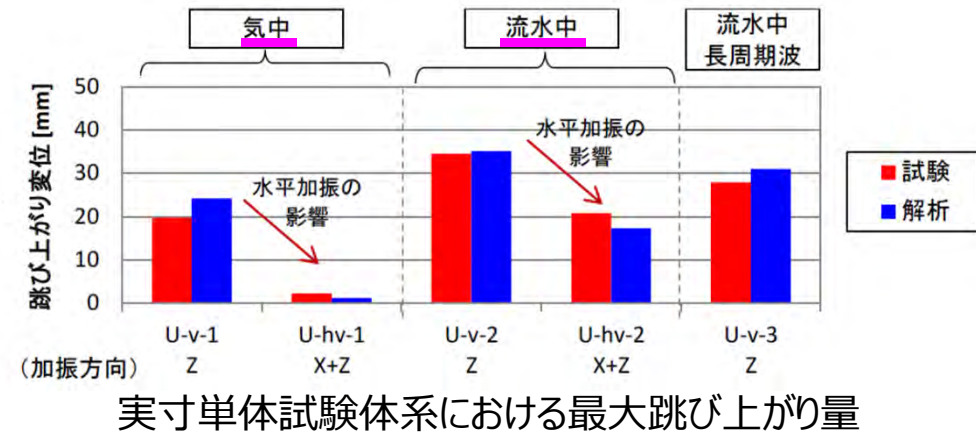
多数体系試験結果



No	コメント
5	上下変位応答の検証にあたり、実寸大試験体系と37体群体系で水中と気中の跳び上がり量の傾向が逆転していることの原因を説明すること。

試験条件の確認

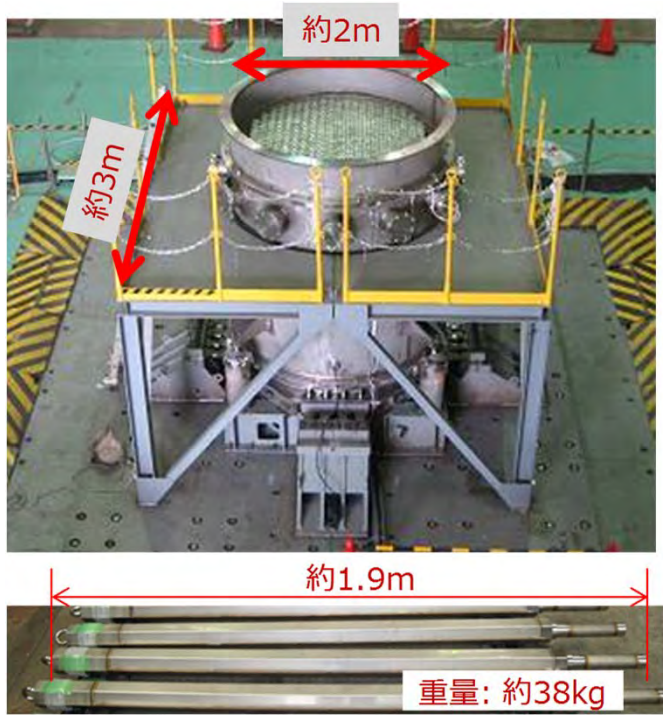
- ◆ 前回監視Tm会合の資料2-2-1において示した「上下変位応答（跳び上がり拳動）の検証」にて実施した試験の条件は、実寸単体試験体系では「気中」及び「流水中」であり、1/1.5縮尺37体群体系では、「気中」、「水中」、「流水中」である。
- ◆ ここで、これらの違いは以下の通り。
 - 「気中」：試験体を内包する水槽に水を入れていない状態
 - 「水中」：試験体系に水を張っているが冷却材を模擬した流れが無い（＝上向き流体力が作用しない）静水状態
 - 「流水中」：試験体内を流れる冷却材流動を模擬（＝上向き流体力が作用する）した状態
- ◆ 気中、水中（流水中）の差は、以下の影響が複合することから、跳び上がり量の傾向が逆転することはありうる。
 - ・反発係数：気中 > 水中 ⇒ 跳び上がり量：気中 > 水中
 - ・見かけの重力加速度：気中 > 水中 ⇒ 跳び上がり量：気中 < 水中
 - ・水平変位：水中の方が小さい傾向だが確定的ではない
- ◆ 跳び上がり量：水中 < 流水中 であるのは定性的な傾向。
- ◆ 本解析手法においては気中、水中、流水中の雰囲気の違いをそれぞれの試験体系でよく模擬できていることは確認している。



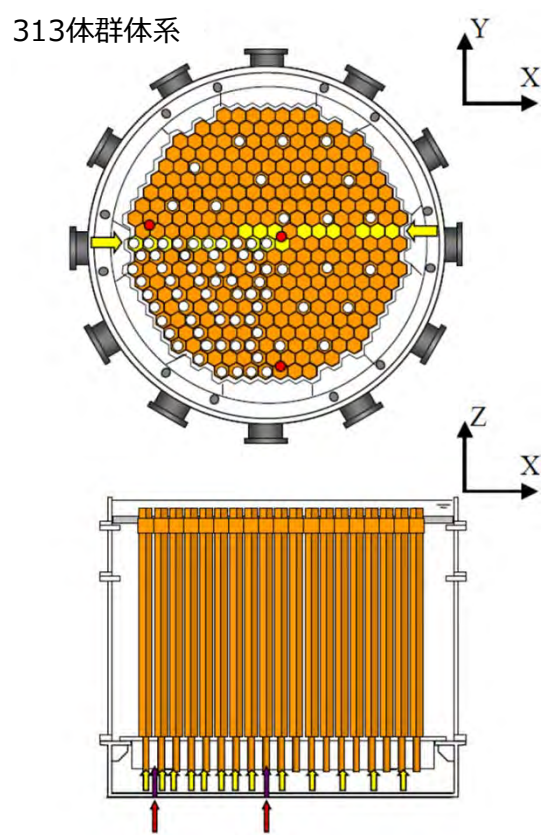
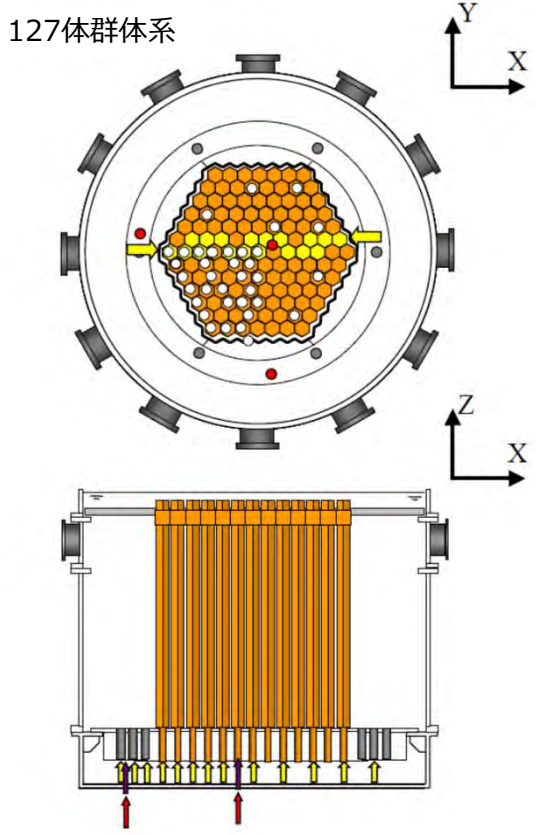
No	コメント
6	32体列体系、127体群体系、313体群体系でも跳び上がり挙動に係る実験を行っているのであれば、その実験の条件、結果、考察などを説明すること。

- ◆ 1/1.5縮尺32体列体系試験については矩形の試験装置の支持板応答を解析評価手法で模擬できなかったため、検証データからは除外している。
- ◆ 1/2.5縮尺127体群体系試験及び313体多数体系試験について説明する。

1/2.5縮尺127体群及び313体多数体系試験の概要



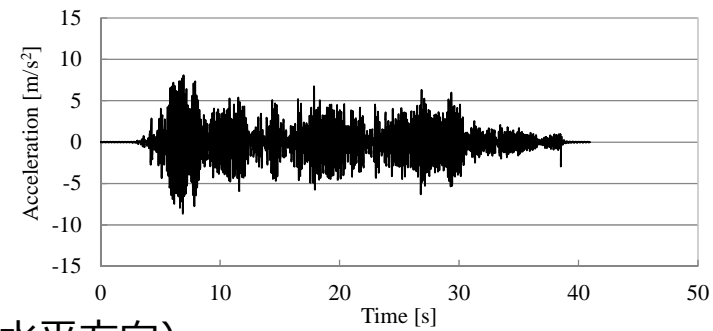
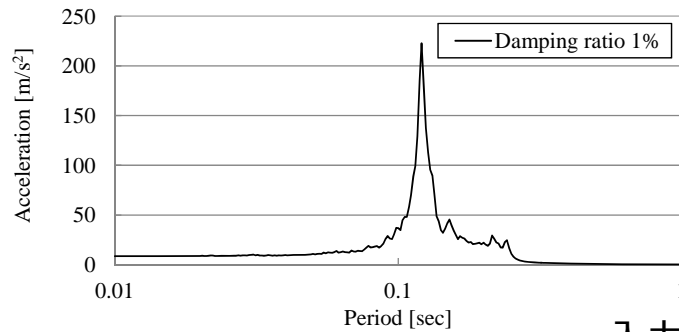
試験装置概要
(写真は313体群体系)



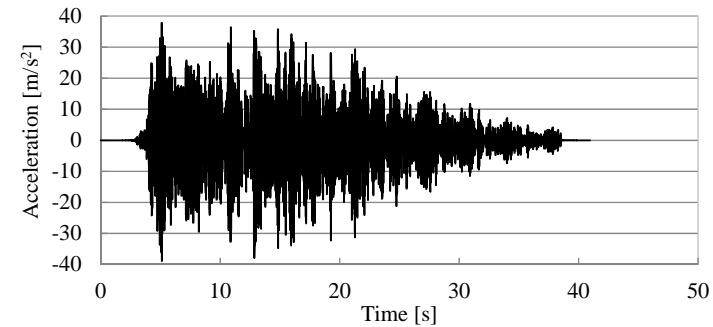
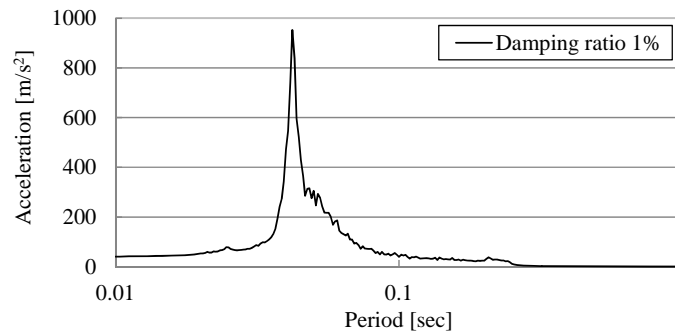
磁歪式変位計
(↑: X方向、○: Z方向)

試験の条件

試験体体数	試験環境	入力波		パッド間 Gap	回数
		波形	加振方向		
127	水中	模擬地震波	Z	0.4mm	3
313	水中	模擬地震波	X+Z	0.4mm	3

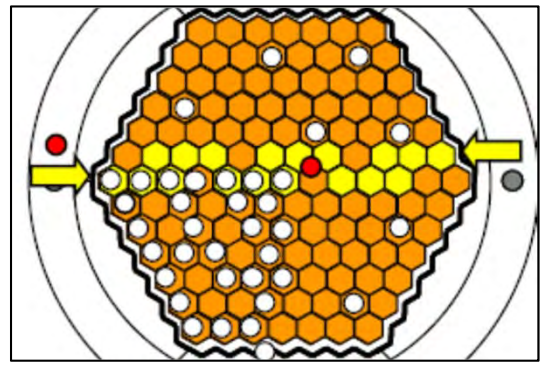


入力波 (水平方向)

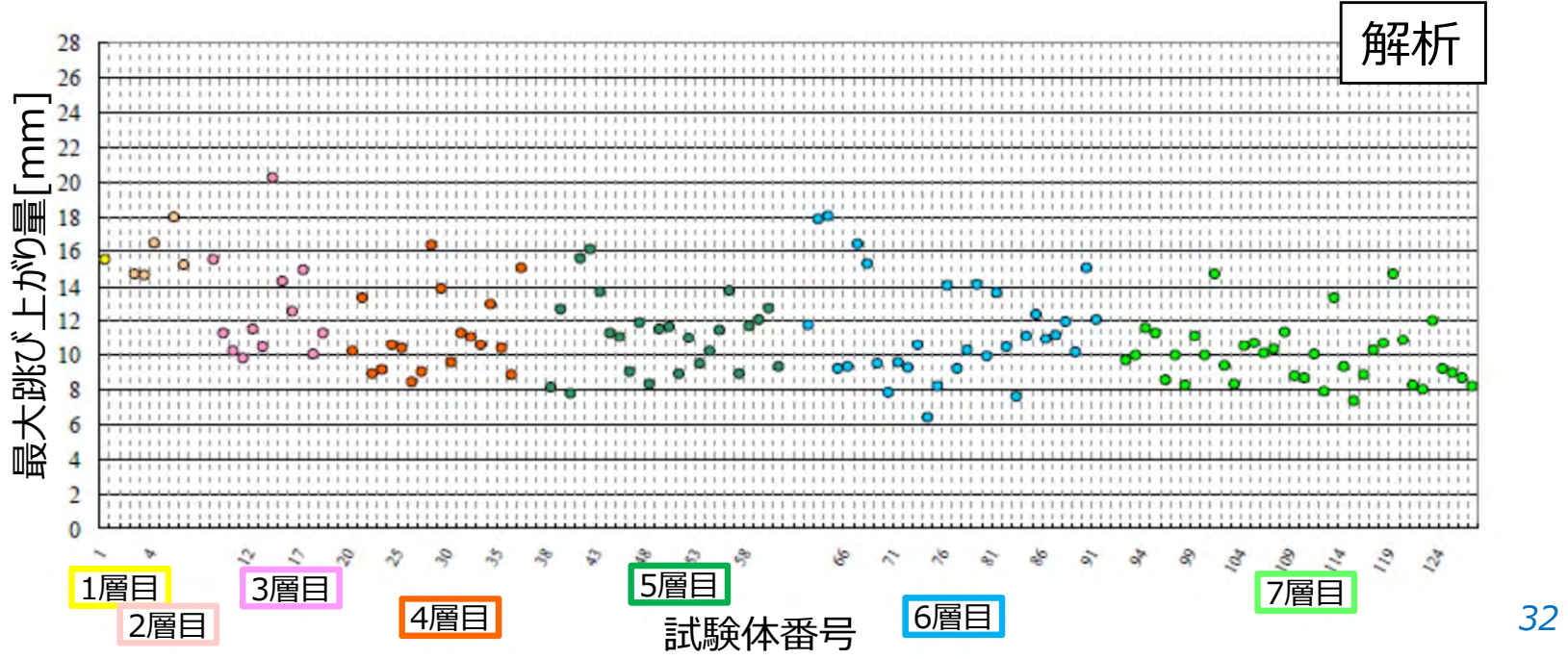
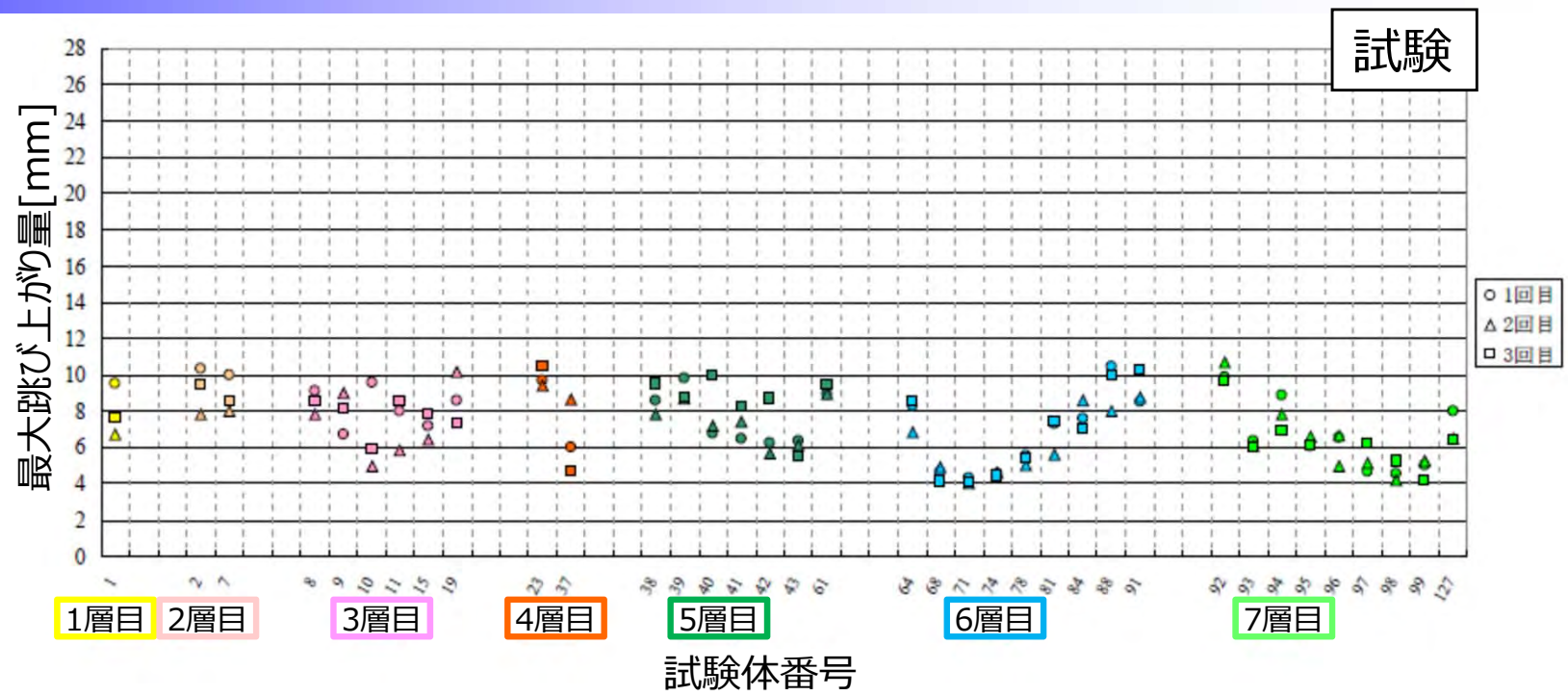


入力波 (上下方向)

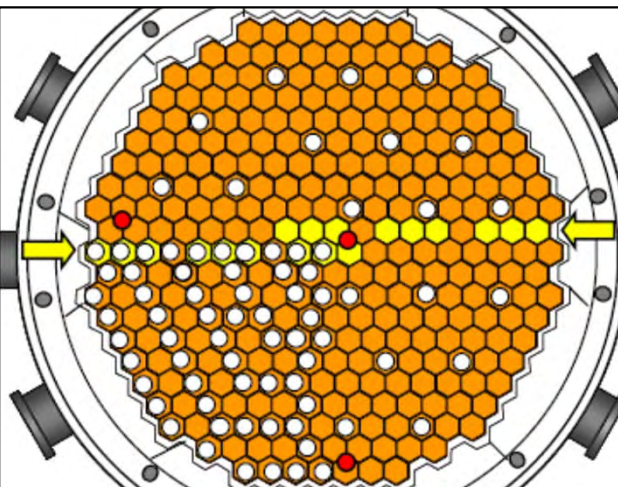
127体群体系 試験結果及び解析結果



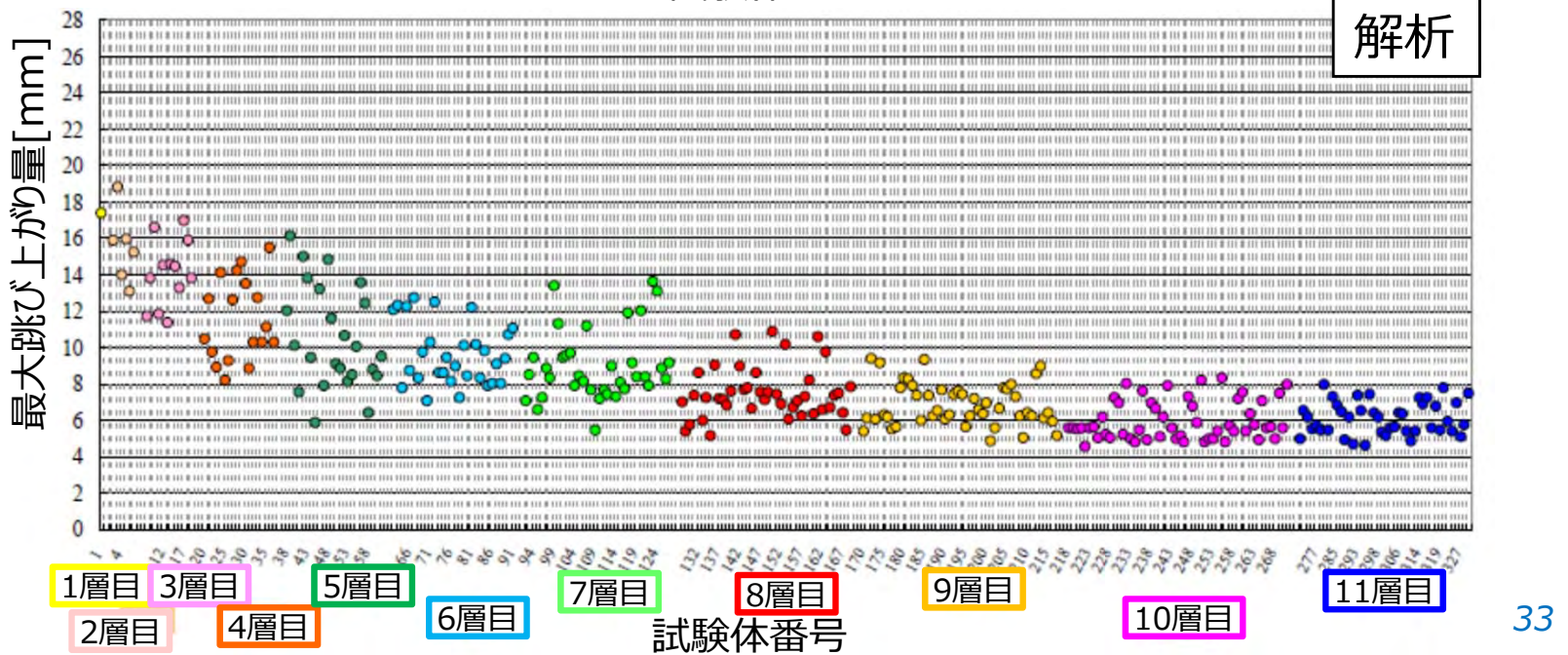
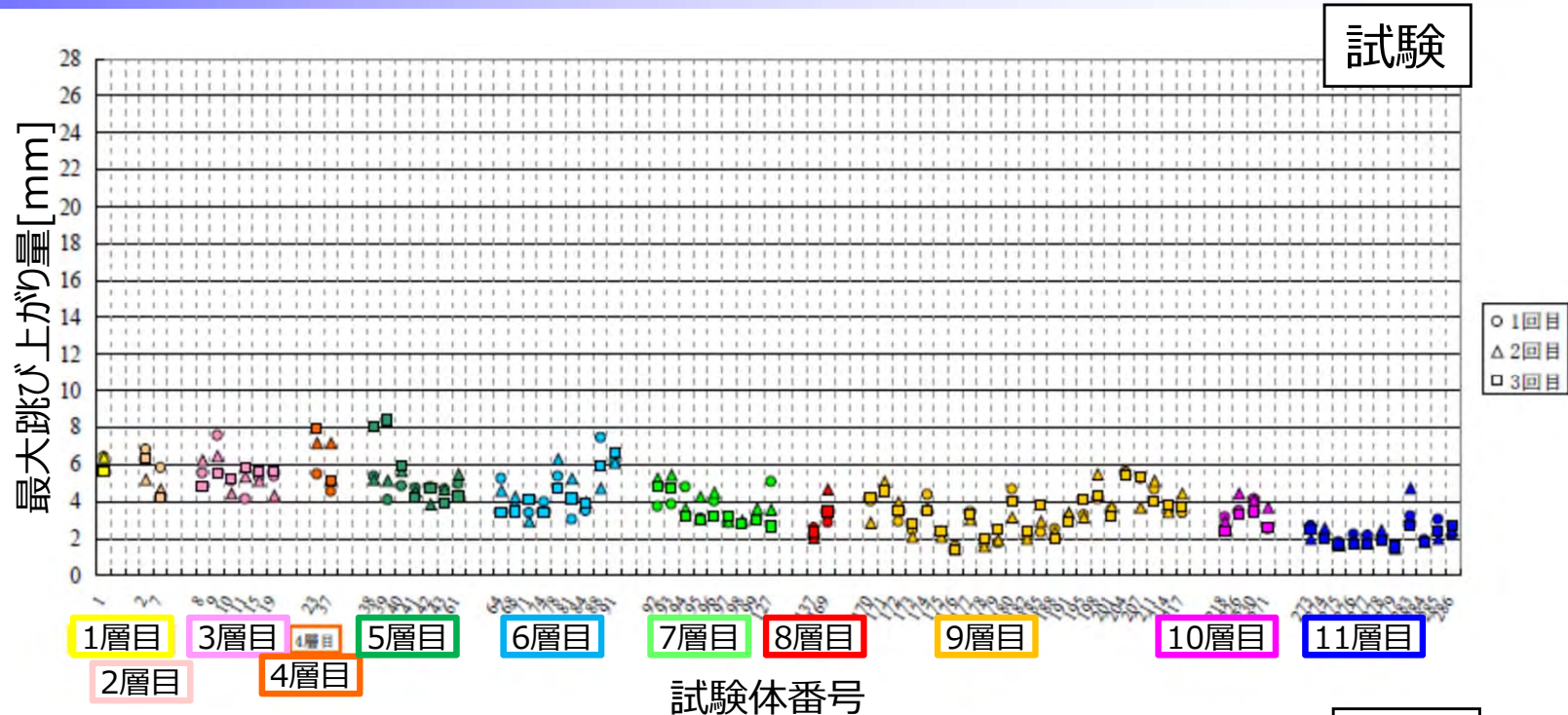
※試験体番号は中心を1（1層目）とし、
外側に向かって番号は増加、最外周は
7層目



313体群体系 試験結果及び解析結果



※試験体番号は中心を1（1層目）とし、
外側に向かって番号は増加、最外周は
11層目

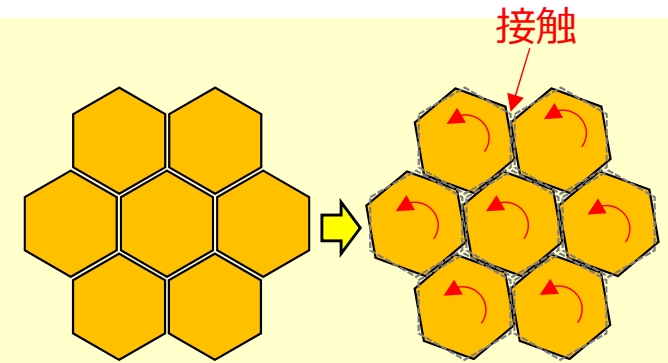


跳び上がり挙動の結果及び考察

- 跳び上がり量：
- ・ 水平 + 上下方向加振時 : 小
 - ・ 上下方向のみ加振時 : 大

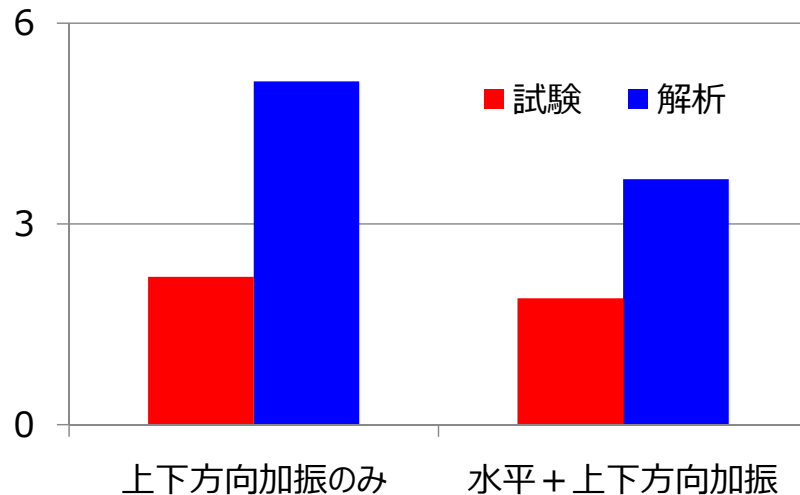
多数体試験とその検証解析を比較すると、解析結果は跳び上がり量を保守的に評価する。

・ 実機体系では特に水平方向加振により、試験体のZ軸の回転により隣接する試験体と接触しその摩擦力が作用し、跳び上がり量を抑制する効果が現れていると推測。一方、解析においては、Z軸周りの回転を考慮していないため、隣接試験体との接触による摩擦力の作用は考慮されないことにより、試験と解析で差が出た要因と考察。



試験体のZ軸方向の回転
→ 接触による摩擦力発生
→ 跳び上がり量抑制効果

313体試験 跳び上がり量[mm]



結果比較例 (313体群)

