

令和 6 年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業

原子力システム研究開発事業

高温ガス炉等新型炉の信頼性向上に資する

AI を用いた耐震評価技術の研究開発

成果報告書

令和 7 年 3 月

国立大学法人 東京大学

本報告書は、文部科学省の原子力システム
研究開発事業による委託業務として、国立大
学法人 東京大学が実施した令和4年度－令和
6年度「高温ガス炉等新型炉の信頼性向上に資
する AI を用いた耐震評価技術の研究開発」の
成果を取りまとめたものです。

目次

概略	v
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2.1-1
3. 業務の実施内容及び成果	
3.1 AI を用いた革新的な詳細耐震解析技術の開発【R4-R6】	3.1-1
3.1.1 地震動データの収集【R4-R5】	3.1-1
3.1.2 GAN を用いた確率論的地震動生成システムの開発【R4-R6】	3.1-2
3.2 プラントライフサイクルにおけるデータ収集・更新システムの構築【R4-R6】	3.2-1
3.2.1 振動試験の実施（再委託先：新潟工科大学）【R4-R6】	3.2-1
3.2.2 データ駆動的な性能更新手法の検討【R4-R6】	3.2-24
3.2.3 革新的な実験データ取得手法・システムの構築【R4-R6】	3.2-34
3.3 高温ガス炉等新型炉の開発段階におけるリスク評価プロセスの開発【R4-R6】	3.3-1
3.3.1 リスク評価プロセスの開発【R4-R6】	3.3-1
3.3.2 客観性向上に向けた産業界等の意見とりまとめ【R4-R6】	3.3-6
3.4 研究推進【R4-R6】	3.4-1
4 結言	4-1
表一覧	
表 3.1.2-1 有限要素モデルの概要	3.1-12
表 3.1.2-2 材料特性	3.1-12
表 3.2.1-1 黒鉛と塩化ビニルの物性	3.2-5
表 3.2.1-2 加振ケース一覧	3.2-13
表 3.2.1-3 実験諸元	3.2-21
表 3.2.2-1 モデルパラメータの正解値	3.2-27
表 3.2.2-2 尤度の計算に要する計算時間の比較	3.2-29
表 3.2.3-1 ベイズ最適化の入力とする 5 つの応答解析結果	3.2-36
図一覧	
図 2.1-1 本業務の全体計画図	2.1-1
図 3.1.1-1 データセット a) の震源・観測点位置とマグニチュードと断層最短距離分布	3.1-1

図 3.1.1-2	余震を除去した記録の例	3.1-2
図 3.1.2-1	解析モデル	3.1-4
図 3.1.2-2	生成した加速度時刻歴波形（図左）と加速度応答スペクトル（減衰定数 5%） （図右）の例	3.1-5
図 3.1.2-3	生成された最大加速度のフラグと学習データの比較	3.1-6
図 3.1.2-4	生成された地震動データの例	3.1-7
図 3.1.2-5	生成された震源・伝播経路特性ラベルと学習データの比較	3.1-8
図 3.1.2-6	生成された震源の位置・マグニチュードと学習データの比較	3.1-8
図 3.1.2-7	生成された最大加速度のフラグと学習データの最大加速度の比較	3.1-8
図 3.1.2-8	生成された地盤の S 波速度構造の例	3.1-9
図 3.1.2-9	生成された地盤の S 波速度構造と学習データの比較	3.1-9
図 3.1.2-10	UMAP で 3 次元データに変換した StyleGAN2 の中間潜在変数	3.1-10
図 3.1.2-11	多出力ガウス回帰の結果と時刻歴応答解析結果の比較	3.1-11
図 3.1.2-12	解析対象と有限要素モデル化	3.1-12
図 3.1.2-13	入力地震動加速度波形	3.1-13
図 3.1.2-14	解析モデルの概要	3.1-13
図 3.1.2-15	JMA 神戸 NS の加速度入力時の応答のスナップショット	3.1-14
図 3.1.2-16	JMA 神戸 NS の加速度入力時のブロック重心位置の相対変位の時刻歴 応答	3.1-14
図 3.1.2-17	生成された地震動時刻歴波形の例	3.1-16
図 3.1.2-18	生成された条件ラベル (M_W, R_{rup}, V_{S30}) の分布と学習データの比較	3.1-16
図 3.1.2-19	地震ハザード $p(g s)$ の例	3.1-17
図 3.1.2-20	地表面最大速度に関する地震ハザード曲線の評価結果	3.1-17
図 3.1.2-21	提案する代替モデルの概要	3.1-18
図 3.1.2-22	検証用データの応答と代替モデルの予測値の比較	3.1-19
図 3.2.1-1	振動台写真	3.2-7
図 3.2.1-2	セットアップとセンサ設置位置 [単位:mm]	3.2-7
図 3.2.1-3	加振波	3.2-8
図 3.2.1-4	試験体	3.2-9
図 3.2.1-5	画像相関法で求めた各部位の変位のスナップショット	3.2-9
図 3.2.1-6	MEMS 型加速度計で求めた各部位の最大変位	3.2-10
図 3.2.1-7	水平方向の相対変位の時刻歴波形	3.2-10
図 3.2.1-8	最上段のブロックの上下方向の相対変位の時刻歴波形	3.2-11
図 3.2.1-9	最下段のブロックの重心位置における相対変位の比較の例	3.2-11
図 3.2.1-10	3 コラム試験体セットアップ概要	3.2-12
図 3.2.1-11	各ブロックの相対加速度のフーリエスペクトルと位相差分スペクトル の例	3.2-15
図 3.2.1-12	各ブロックの重心位置における相対変位の比較の例	3.2-15
図 3.2.1-13	ブロックの角を面取りしたモデル	3.2-16

図 3.2.1-14	面取りの有無による応答性状の違い（正弦波 7 Hz による加振）	3.2-17
図 3.2.1-15	令和 6 年度の振動台実験のセットアップ概要	3.2-19
図 3.2.1-16	最大変位時の応答形状 [単位 : mm]	3.2-21
図 3.2.1-17	相対変位時刻歴波形、相対加速度フーリエ振幅スペクトル及び位相差分	3.2-22
図 3.2.2-1	変分オートエンコーダー (VAE) のグラフィカルモデル	3.2-25
図 3.2.2-2	マルチモーダル変分オートエンコーダー (Multimodal VAE [JMVAE-kl]) のグラフィカルモデル	3.2-25
図 3.2.2-3	変分オートエンコーダー (VAE) を用いたモデル更新手法の検証手順	3.2-26
図 3.2.2-4	3 質点系モデル	3.2-27
図 3.2.2-5	入力地震動	3.2-28
図 3.2.2-6	正解モデルの応答波形（一部）	3.2-28
図 3.2.2-7	VAE の構成	3.2-28
図 3.2.2-8	事後分布の累積分布関数と正解値の比較	3.2-29
図 3.2.2-9	予測問題における入力地震動	3.2-30
図 3.2.2-10	予測問題に対するモデルごとの地震応答のばらつき	3.2-30
図 3.2.2-11	二自由度系モデル	3.2-32
図 3.2.2-12	VAE の構成	3.2-32
図 3.2.2-13	ハイパーパラメータの推定結果	3.2-33
図 3.2.3-1	デジタル画像相関法を用いた 3 次元計測結果の例	3.2-35
図 3.3.1-1	改良したリスク評価プロセスの素案	3.3-5

略語一覧

AI	: Artificial Intelligence	(人工知能)
ASI	: Automated Surface Inspection	(自動表面検査)
ATENA	: Atomic Energy Association	(原子力エネルギー協議会)
D/G	: Diesel/Generator	(ディーゼル発電機)
EF(scale)	: Enhanced Fujita (scale)	(改良藤田スケール)
GAN	: Generative Adversarial Networks	(敵対的生成ネットワーク)
HTTR	: High Temperature Engineering Test Reactor	(高温工学試験研究炉)
IoT	: Internet of Things	(もののインターネット)
JAEA	: Japan Atomic Energy Agency	(日本原子力研究開発機構)
JANTI	: Japan Nuclear Technology Institute	(日本原子力技術協会)
JMA	: Japan Meteorological Agency	(気象庁)
Mw	: Moment magnitude scale	(モーメントマグニチュード)
MEMS	: Micro Electro Mechanical Systems	(微小電気機械システム)
MQTT	: Message Queuing Telemetry Transport	(エムキューキューティーティー)
NTP	: Network Time Protocol	(ネットワーク・タイム・プロトコル)
PSR	: Periodic Safety Review	(定期安全レビュー)
PVC	: Polyvinyl chloride	(ポリ塩化ビニル)

PWR	: Pressurized Water Reactor	(加圧型軽水炉)
SPI	: Serial Peripheral Interface	(シリアル・ペリフェラル・ インターフェース)
UCB	: Upper Confidence Bound	(信頼上限)
VAE	: Variational Autoencoder	(変分オートエンコーダー)

概略

本業務では、福島第一原子力発電所の事故を受けて再認識された原子力安全への影響が大きい地震等の自然外部事象に関して、優れた固有安全性を有する高温ガス炉の安全性をさらに高めるプラントエンジニアリングを構築することを目的とし、地震に関する画期的なリスク評価プロセスの開発に資する基盤研究を実施した。具体的には AI を用いた地震動波形の生成手法の開発を含めた AI を用いた革新的な詳細耐震解析技術の開発、プラントライフサイクルにおけるデータ収集・更新システムの開発、高温ガス炉等新型炉におけるリスク評価プロセスの開発を実施した。振動試験の実施にあたっては、安全性への影響が生じるような事象・シナリオを抽出した上で実施し、その試験の効率化に資するよう、試験結果の影響度の高いインプットパラメータを学習・抽出可能な、革新的な実験データ取得手法・システムの開発を行った。さらに、類似試験体において、実振動試験無しに振動試験データの模擬を可能とするようなシステム構築に資する技術基盤を構築した。

(1) AI を用いた革新的な詳細耐震解析技術の開発（実施内容と成果を 3.1 に記載）

①地震動データの収集

地震動観測記録及び地震動予測に用いるパラメータに関する情報を収集した。

②GAN を用いた確率論的地震動生成システムの開発

新型炉の立地地点における地震動波形を生成する確率論的地震動ハザード評価手法を確立した。確立した手法を用いて確率論的地震動生成システムを構築し、妥当性を検証した。また、開発した手法を拡張し、時刻歴応答解析を基本とした確率論的地震リスク評価を実現するために、応答解析の代替モデルとシームレスに統合する方法を検討した。

(2) プラントライフサイクルにおけるデータ収集・更新システムの構築（実施内容と成果を 3.2 に記載）

①振動試験の実施

実構造物と同じ地震動による応力状態等を模擬可能な相似則を踏まえた振動試験計画の策定及び試験体の検討を行い、振動台試験を実施した。また、振動試験のデータ取得と革新的な実験データ取得方法の検討を行うとともに、振動試験結果について再現性を解析するための分析を行った。

②データ駆動的な性能更新手法の検討

プラントにおいて地震時挙動を監視し、収集したデータに基づきデータ駆動的にモデルを更新し、設計想定範囲を超えた事象も含めて安全上重要となりうる事象を評価する手法を、変分オートエンコーダー（VAE）を用いて構築した。

③革新的な実験データ取得方法・システムの構築

振動台を用いて取得した試験データをもとに、類似の試験体（将来的に改良が加えられた試験体等）や事象・シナリオにおいて、実試験無しに振動試験データの模擬を可能とするようなシステムに資する技術基盤を構築するために、試験結果への影響度の高いインプットパラメータの特定手法の検討を実施した。

(3) 高温ガス炉等新型炉の開発段階におけるリスク評価プロセスの開発（実施内容と成果を 3.3 に記載）

①リスク評価プロセスの開発

構築する評価手法の実適用に向けて、プラントライフサイクル全体における継続的なリスクプロファイルの更新と活用プロセスの構築について各分野の専門家、研究者・技術者などの意見を集め評価プロセスにおける論点を明確にして検討した。

②客観性向上に向けた産業界等の意見取りまとめ

産業界等の専門家との意見・ニーズ聴取に向けて、事前作業として高温工学試験研究炉（HTTR）における規制対応・関連研究等の情報を調査した上で、産業界等の意見・ニーズの聴取として会合を開催した。これらの会合の議論を踏まえ示唆を取りまとめた。

(4) 研究推進（実施内容と成果を 3.4 に記載）

研究代表者の下で各研究項目間の連携を密にして研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

また、今後の展望としては、次が挙げられる。

- ・「AI を用いた革新的な詳細耐震解析技術」については、より性能規定型（Performance-based）に発展させることができる可能性がある。例えば、統計的安全評価などと組み合わせることによる従来の決定論的な耐震設計手法の革新や、様々な条件に対して性能を確保する設計法（ロバスト設計法）への展開などが考えられる。
- ・「プラントライフサイクルにおけるデータ収集・更新システム」については、より具体的な問題への適用を行い、手法としての有効性を高めることが求められる。また、本手法自体は、汎用的な手法であることから、耐震安全性の検討以外の様々な問題に適用が可能であると考えられる。他の原子力安全に関わる問題への適用性も今後の課題として検討したい。

1. はじめに

本事業では、福島第一原子力発電所の事故を受けて再認識された原子力安全への影響が大きい地震等の自然外部事象に関して、優れた固有安全性を有する高温ガス炉の安全性をさらに高めるプラントエンジニアリングを構築することを目的とし、地震に関する画期的なリスク評価プロセスの開発に資する基盤研究を実施した。具体的には AI を用いた地震動波形の生成手法の開発を含めた AI を用いた革新的な詳細耐震解析技術の開発、プラントライフサイクルにおけるデータ収集・更新システムの開発、高温ガス炉等新型炉におけるリスク評価プロセスの開発を実施した。振動試験の実施にあたっては、安全性への影響が生じるような事象・シナリオを抽出した上で実施し、その試験の効率化に資するよう、試験結果の影響度の高いインプットパラメータを学習・抽出可能な、革新的な実験データ取得手法・システムの開発を行った。さらに、将来的には、類似試験体において、実振動試験無しに振動試験データの模擬を可能とするようなシステム構築に資する技術基盤を構築した。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画図を図 2.1-1 に示す。

年度 項目	令和4年度	令和5年度	令和6年度
(1) AIを用いた革新的な詳細耐震解析技術の開発			
①地震動データの収集	データ収集	データ収集	
②GANを用いた確率論的地震動生成システムの開発	地震動生成システム	地震動生成システムの試開発	地震動生成システムの開発と妥当性検証
(2) プラントライフサイクルにおけるデータ収集・更新システムの構築			
①振動試験の実施 (再委託先：新潟工科大学)	試験計画の策定・試実施	振動試験・データ取得	振動試験・データ取得
②データ駆動的な性能更新手法の検討	性能更新手法の検討	性能更新手法の検証・試開発・検証	性能更新手法の開発・検証
③革新的な実験データ取得方法・システムの構築	取得方法・システムの検討	取得方法・システムの検討	取得方法・システムの検討
(3) 高温ガス炉等新型炉の開発段階におけるリスク評価プロセスの開発			
①リスク評価プロセスの開発	リスク評価プロセスの検討	リスク評価プロセスの試開発	リスク評価プロセスの開発
②客観性向上に向けた産業界等の意見取りまとめ	意見聴取・とりまとめ	意見聴取・取りまとめ	意見聴取・結果の反映
(4) 研究推進	打合せの実施	打合せの実施	打合せの実施

図 2.1-1 本業務の全体計画図

3. 業務の実施内容及び成果

3.1 AI を用いた革新的な詳細耐震解析技術の開発【R4-R6】

3.1.1 地震動データの収集 【R4-R5】

【R4-R5】

令和4年度は、地震動観測記録及び地震動予測に用いるパラメータに関する情報を収集した。

具体的には、防災科学技術研究所強震観測網 K-NET, KiK-net の記録を対象に、2 種類の地震動観測記録 (a) 比較的規模の大きい (M_w が 5.1 以上の) 地殻内地震の近距離 (断層最短距離 100 km 以下) の K-NET 観測点における観測記録、b) 比較的規模の大きい (M_w が 5.1 以上の) 様々な地震タイプの地震について震源距離が 200 km 以下の観測点における K-NET, KiK-net の観測記録) を収集し、あわせて、地震動予測に用いるパラメータ (地震規模、震源位置、観測点位置、地盤情報など) に関する情報を収集した。

a) のデータセットについては、文献(1)のデータを拡張したものについて、本研究開発の要件に合せて再度整理したものである。図 3.1.1-1 に震源・観測点位置とマグニチュードと断層最短距離分布を示す。b) のデータセットについては、より多くの学習データを必要となることを想定して今回新たに整備を行った。

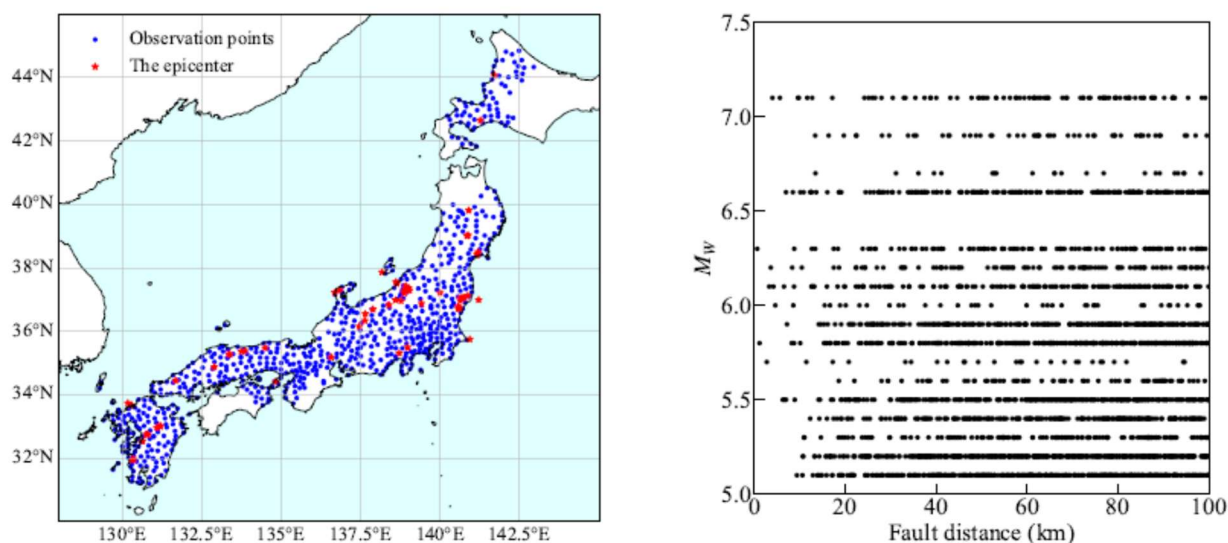


図 3.1.1-1 データセット a) の震源・観測点位置とマグニチュードと断層最短距離分布

令和5年度は、地震動観測記録及び地震動予測に用いるパラメータに関する情報について、令和4年度に収集したデータを拡張した。

具体的には、a) のデータセットについて、地震動の継続時間を 40.96 秒から 81.92 秒に拡張し、後続の振動まで含めたデータセットとした。従来の地震動データにおいても余震の除去を行っていたが、80.92 秒に拡張することで新たに余震が含まれる記録がないか目視で確認を行ったところ 7 記録で余震が含まれていた (図 3.1.1-2)。このため、これらの波形について余震を除去する作業を行った。

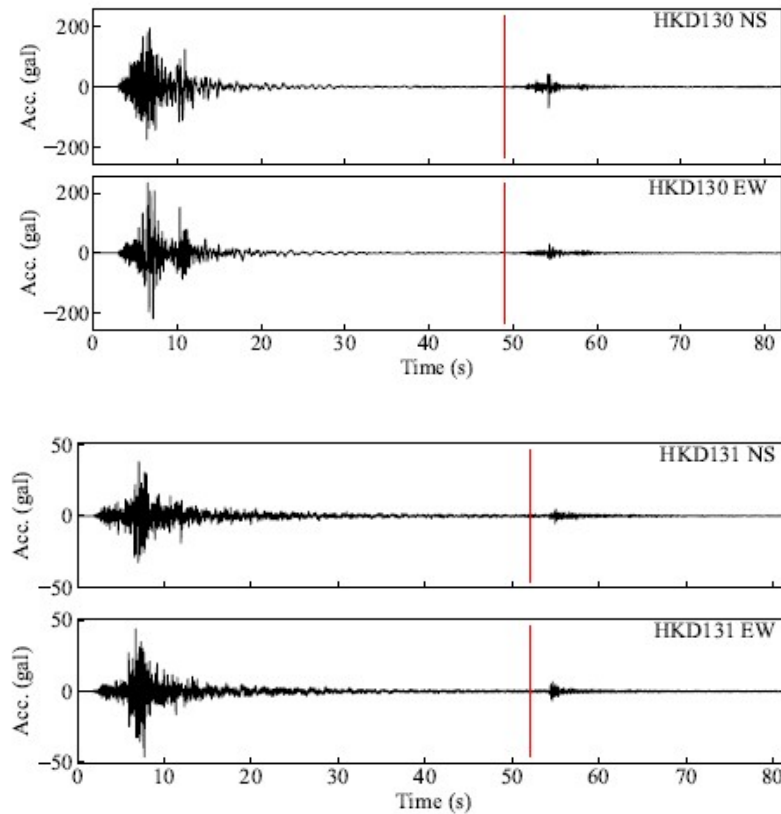


図 3.1.1-2 余震を除去した記録の例

参考文献

- (1) 糸井達哉, 他: 地殻内地震の地震動時刻歴波形の統計的予測法. 第 14 回日本地震工学シンポジウム, 2014.

3.1.2 GAN を用いた確率論的地震動生成システムの開発【R4-R6】

【R4】

令和 4 年度は、敵対的生成ネットワーク (GAN) を用いた手法をベースに、新型炉の立地地点における確率論的地震動ハザード評価について、地震動加速度時刻歴波形を基本に行うことができる手法を検討した。

具体的には、次の (1)、(2) を実施した。

- (1) 地震動加速度時刻歴波形を基本とする確率論的地震動ハザード評価手法の検討
 深層学習モデルとして敵対生成ネットワーク (GAN) のひとつである StyleGAN2⁽¹⁾ を用いて地震動を生成するモデルについて検討した。
- (2) 地震応答に関する確率論的評価手法の検討
 (1) の地震動生成モデルと連動し、構造物の脆弱性を同定する耐震解析技術の枠組みを構築することが重要であるとの認識にいたった。これを踏まえ、StyleGAN2 の中間潜在変数を入力変数とした地震応答予測モデルの代替モデルを構築することを検討した。このため、黒鉛ブロックの応答解析モデルを作成することとし、解析計画の作

成を行った。

解析条件を検討し、解析条件を踏まえて次の6つの解析要件として整理した。

- ・黒鉛ブロックは剛体（将来的には変形体への拡張も想定）として扱う（剛体重心位置での併進回転運動）
- ・側壁は剛体（将来的には変形体への拡張も想定）として扱う
- ・黒鉛ブロック間は接触を考慮
- ・黒鉛ブロックと側壁の接触（衝突）を考慮
- ・接触面は摩擦を考慮
- ・外力として正弦波、及び実地震波の加速度波形を入力

接触（衝突）を扱う解析方法としては、有限要素法を用いることとして、原子力分野の衝突問題などの動解析で実績がある汎用コード LS-DYNA を用いることを前提に検討した。振動台実験（3.2 参照）の試験体の CAD データに基づき解析モデル（図 3.1.2-1）を作成した。

【R5】

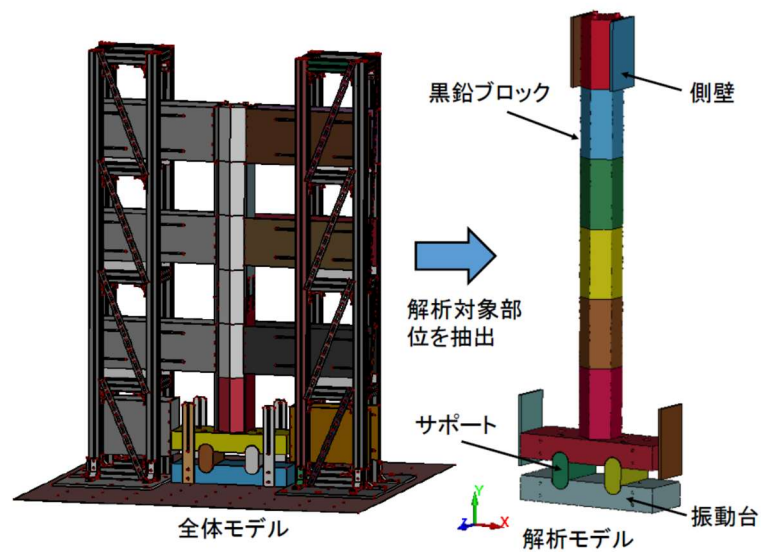
令和5年度は、型炉の立地地点における確率論的地震動ハザード評価について、地震動加速度時刻歴波形を基本に行うことができる手法を試開発した。令和4年度に引き続き、敵対的生成ネットワーク（GAN）を用いた地震動生成手法に基づき、確率論的に多数の地震動加速度時刻歴波形を生成する手法を開発した。また、炉内構造物の応答解析を用いた脆弱性評価手法への展開について、「3.2.3 革新的な実験データ取得方法・システムの構築」と並行して検討した。

具体的には、令和4年度に引き続き、次の(1)、(2)を実施した。

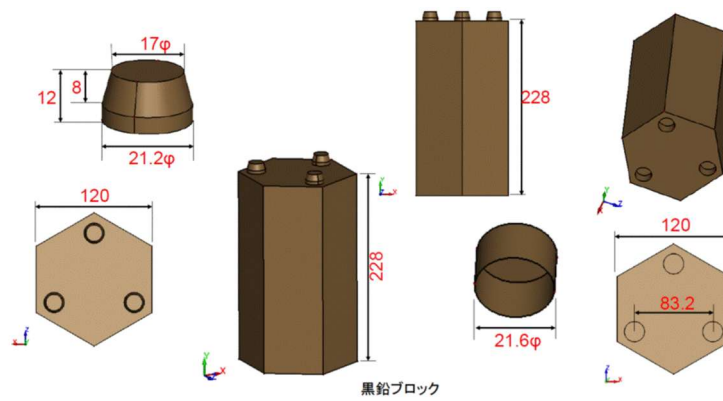
(1) 地震動加速度時刻歴波形を基本とする確率論的地震動ハザード評価手法の試開発

令和4年度までに構築した地殻内地震の地震動データセット（62 地震 2712 記録について、方位を 45 度ごとに回転することで増した 21696 波の水平方向の加速度）について、StyleGAN2⁽¹⁾を用いて、地震動の加速度時刻歴波形の生成を行った（以下、モデル1 と呼称）。データセットの特徴は次の通りである。

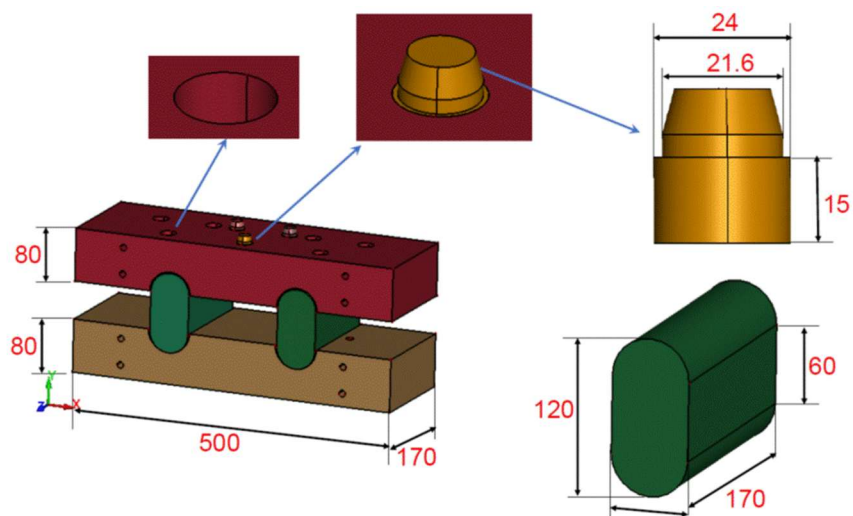
- ・ 防災科学技術研究所 K-NET の地殻内地震の観測記録
- ・ モーメントマグニチュード M_w が 5 より大きい
- ・ 断層から観測点までの距離が 100 km 以下である
- ・ 継続時間 40.96 秒（サンプリング 100 Hz）
- ・ 最大振幅が 1 になるように波形を正規化し、最大加速度の情報はラベルとして保持し波形と同時に学習する。



(a) 全体図



(b) 黒鉛ブロック



(c) プレナムブロックとサポートポスト

図 3.1.2-1 解析モデル[単位:mm]

図 3.1.2-2 に 生成した加速度時刻歴波形（図左）と加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）（図右）を示す。加速度時刻歴波形は生成した時刻歴波形にフラグとして生成される最大加速度を乗じることで求めている。図 3.1.2-3 に生成された最大加速度のフラグの頻度分布と学習データの比較を示す。両者は概ね整合した。

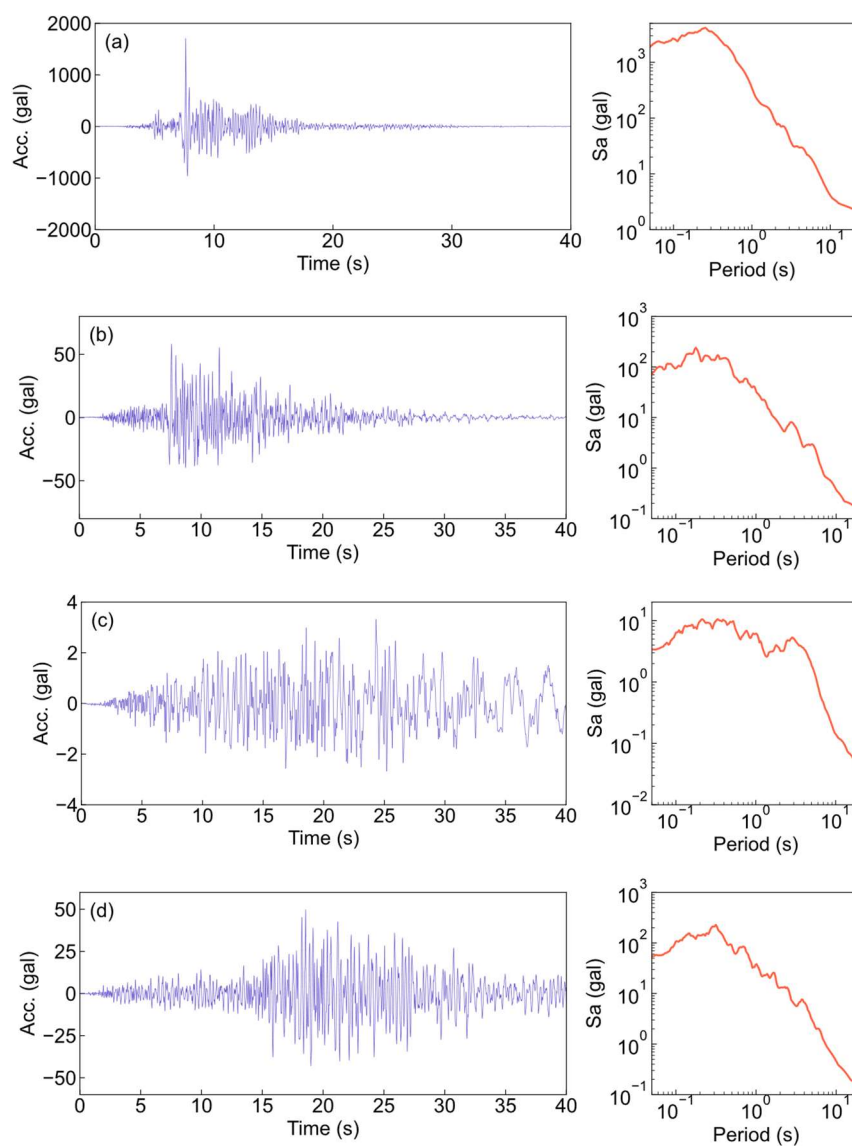


図 3.1.2-2 生成した加速度時刻歴波形（図左）と
加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）（図右）の例

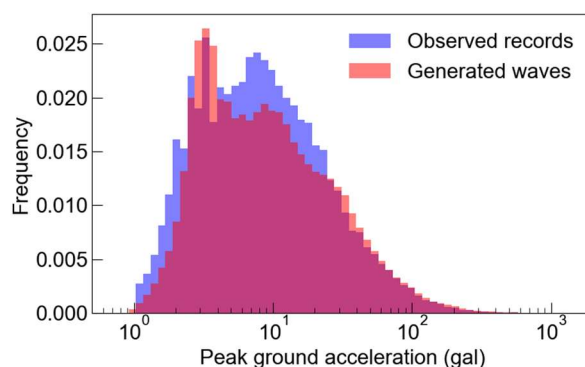


図 3.1.2-3 生成された最大加速度のフラグと学習データの比較

次に、より発展的なモデルとして、学習データとして次の 28 個の値をラベルとして学習した。

1. モーメントマグニチュード M_w
2. 震源深さ [km]
3. 震源の緯度・経度
4. 断層最短距離 [km]
5. 観測点の緯度・経度
6. 表層から深さ 20 m までの 1 m ごとの S 波速度 [m/s] (計 20 個)
7. S 波速度が 1500 m/s になる層までの深さ Z_{1500} [m]

ここでは令和 5 年度構築した地殻内地震の地震動データセット (データセット a) の 62 地震 2712 記録について、方位を 45 度ごとに回転することで水増しした 21696 波の水平方向の加速度、継続時間 80.92 秒) について、StyleGAN2 を用いて、地震動の加速度時刻歴波形の生成を行った (以下、モデル 2 と呼称)。生成した地震動の例を図 3.1.2-4 に示す。図 3.1.2-5、3.1.2-6 に生成された震源・伝播経路特性ラベルと学習データの分布の比較、図 3.1.2-7 に生成された最大加速度のフラグと学習データの最大加速度の分布の比較、図 3.1.2-8、3.1.2-9 に生成された地盤構造と学習データの分布の比較を示す。両者は概ね一致しており、多数の地震動加速度時刻歴波形を生成する手法として概ね適切なものが構築できたと考えられる。

立地地点と想定する震源の諸元 (位置、マグニチュードなど) を設定すると、開発した地震動生成手法に基づき確率論的に多数の地震動加速度時刻歴波形を生成する手法を用いることで、多数の生成地震動の中から対応する波形群を得ることができ、これをもって確率的な地震動評価とすることができる。確率論的地震動ハザード評価は、地震発生確率などの評価 (長期評価) と地震動予測からなるが、前者については、従来の確率論的地震動ハザード評価と同様の情報を用いることができる。以上より、地震動加速度時刻歴波形を基本に確率論的地震動ハザード評価を行う手法について試開発を行うことができた。

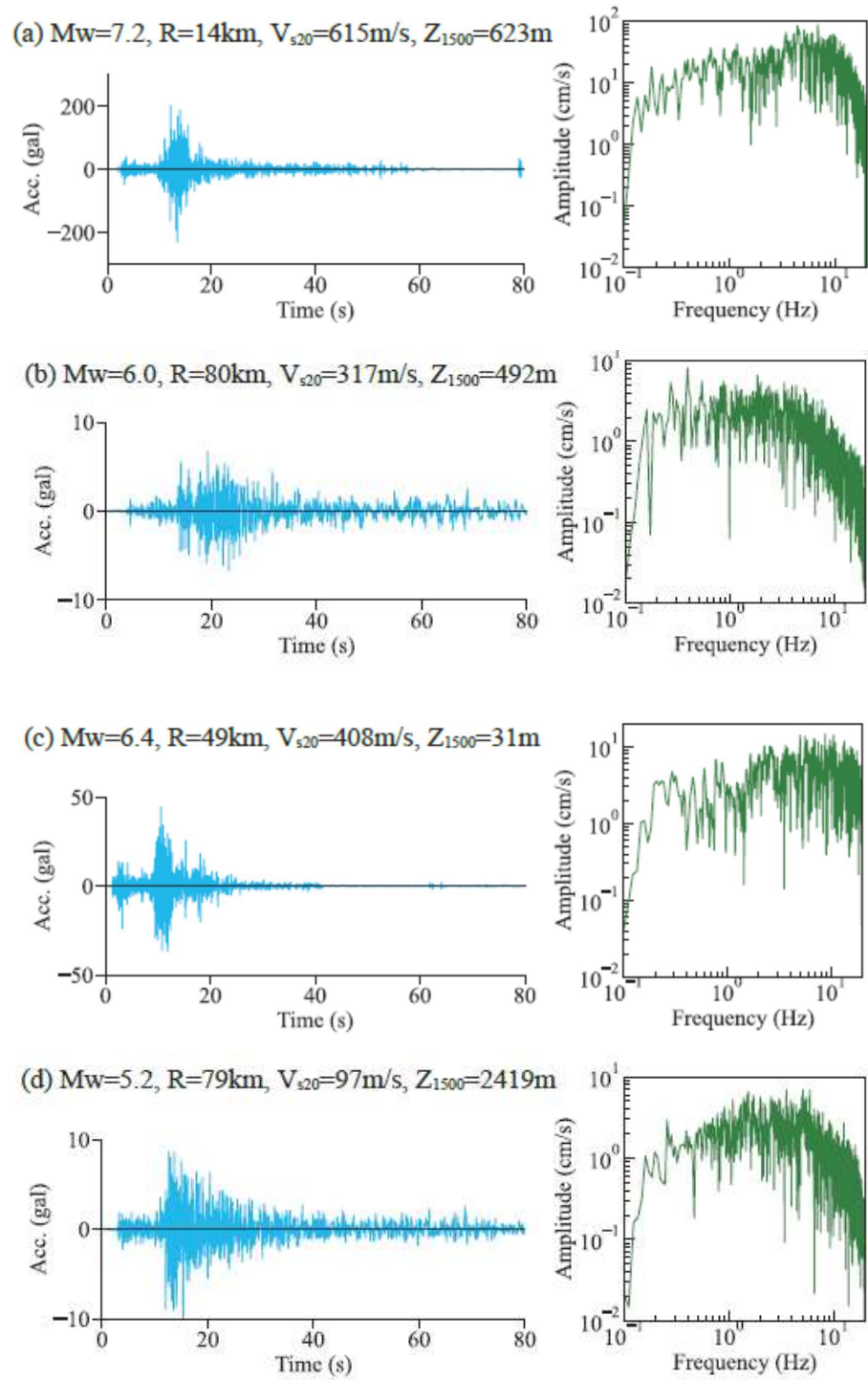


図 3.1.2-4 生成された地震動データの例
(左：加速度時刻歴波形、右：フーリエ振幅スペクトル)

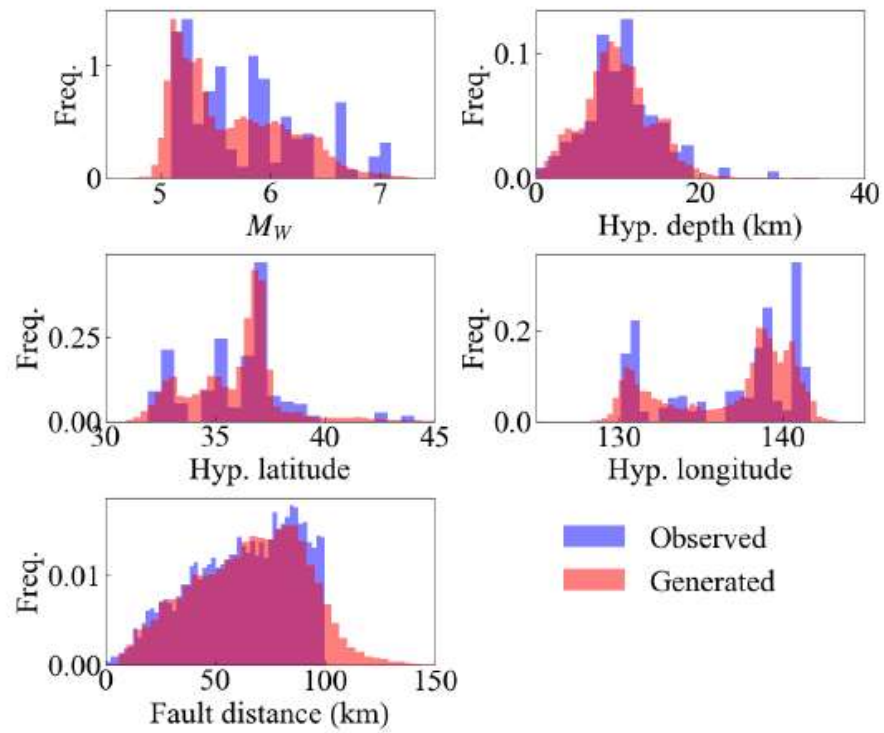


図 3. 1. 2-5 生成された震源・伝播経路特性ラベルと学習データの比較

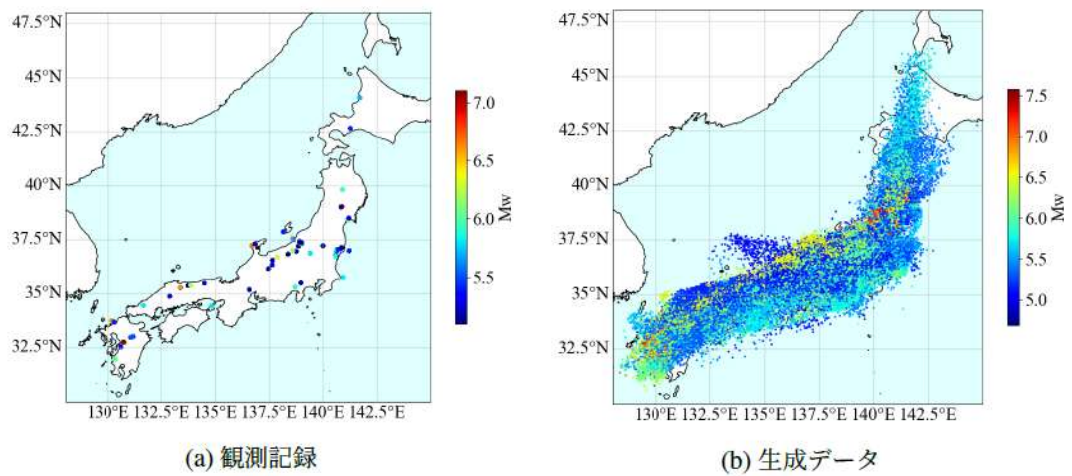


図 3. 1. 2-6 生成された震源の位置・マグニチュードと学習データの比較

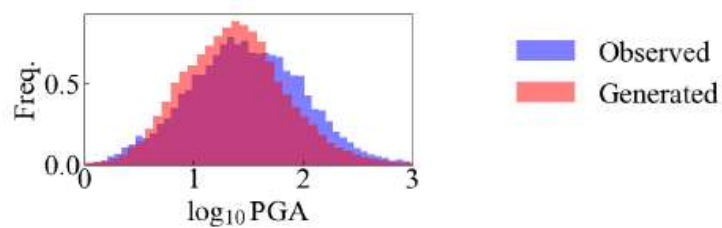


図 3. 1. 2-7 生成された最大加速度のフラグと学習データの最大加速度の比較

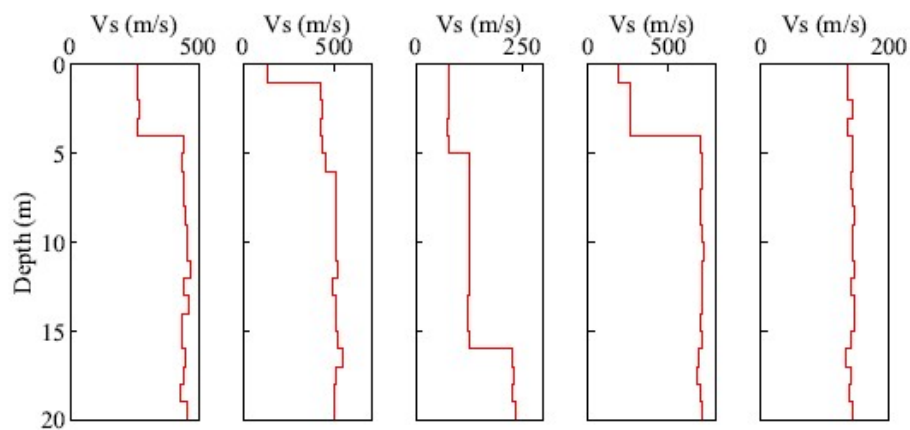


図 3.1.2-8 生成された地盤の S 波速度構造の例

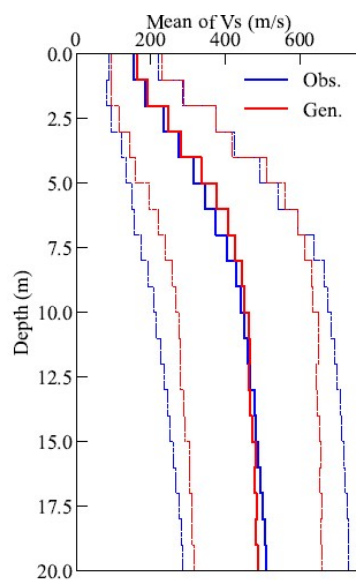


図 3.1.2-9 生成された地盤の S 波速度構造と学習データの比較

(2) 炉内構造物の応答解析を用いた脆弱性評価手法への展開

① 中間潜在変数を説明変数とした代替モデル構築に関する検討

時刻歴応答解析を基本とした確率論的地震リスク評価を実現するためには、多数の地震動に対して応答評価を行う必要がある。一方、有限要素法など計算負荷が高い応答解析モデルを用いて多数の地震動に対する応答解析を行う場合、計算負荷が課題となる。これを解決する方法の一つに代替モデルがある。StyleGAN2 モデルの中間潜在変数は、地震動の特徴に関する情報を含むことから、応答解析の代替モデルにおいて説明変数として用いることができる可能性があることを令和 4 年度に検討した。さらに検討するため、UMAP (Python ライブラリの umap-learn を使用) ⁽¹⁾⁽²⁾ を用いて低次元のデータに変換することを試みた。

5 質点系のばね・マスモデル (各点の質量を 100 ton、各層のばね定数を 500000 kN/m、減衰定数は 1 次モードと 2 次モードが 0.05 となるようなレイリー減衰) を考え、StyleGAN2 (モデル 1) で生成した 10 万の地震動を入力とした地震応答解析を行い、構造物の応答として最大層間変形を求める。次に、UMAP で中間潜在変数を 3 次元データに変換し、応答 (最大層間変形角) の大きさに色付けして可視化した結果を図 3.1.2-10 に示す。応答 (最大層間変形角) の大小に応じて色が分かれており、中間潜在変数は地震応答を予測する説明変数として活用が可能であることが示唆される。

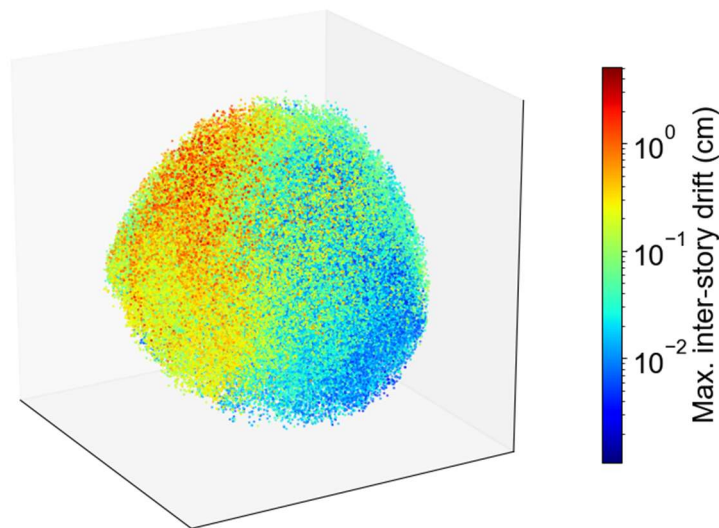


図 3.1.2-10 UMAP で 3 次元データに変換した StyleGAN2 の中間潜在変数

以上を踏まえて、UMAP で低次元化したデータを説明変数とし、5 質点系の各層の最大層間変形を同時に予測する多出力ガウス過程回帰モデルを GPyTorch で構築した。図 3.1.2-11 にガウス過程回帰の予測と実際の時刻歴応答解析結果の比較を示す。図で F1～F5 は第 1 層～第 5 層を表す。ガウス過程回帰の予測は実際の応答解析結果とよく対応している。以上より、ガウス過程回帰モデルで多数の応答解析を代替できる可能性があることを示した。

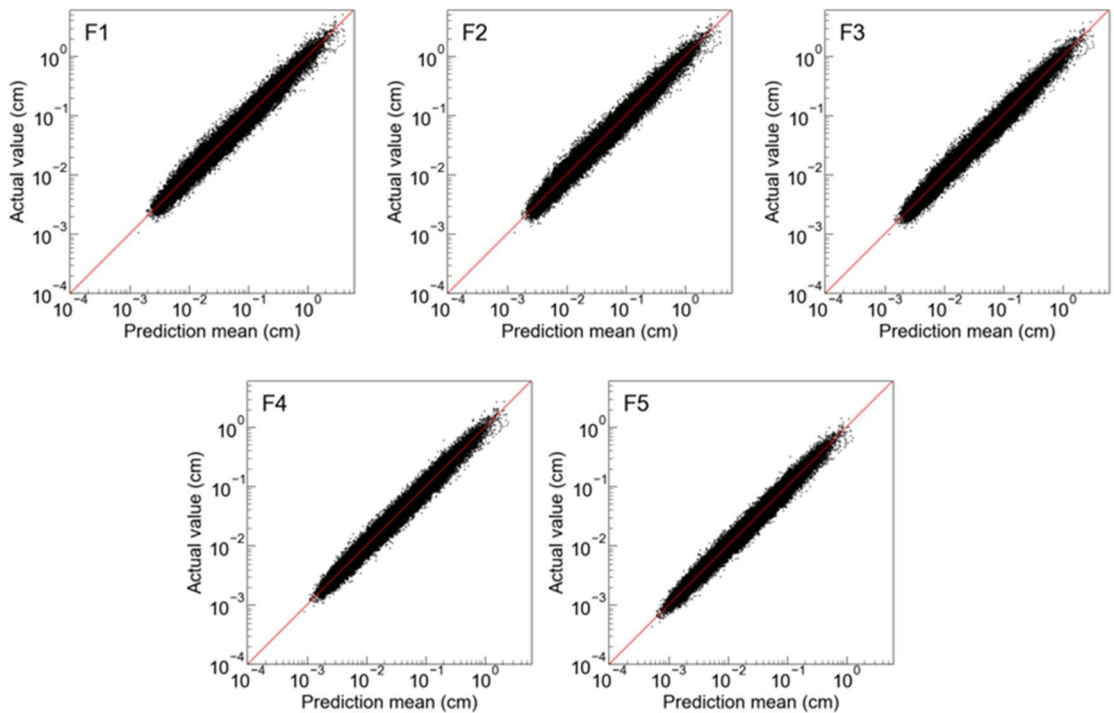


図 3. 1. 2-11 多出力ガウス回帰の結果と時刻歴応答解析結果の比較

② 炉内構造物の地震応答解析手法の検討

令和4年度に決定した黒鉛ブロックの応答解析手法の6項目の解析要件と解析方法に基づき、解析モデルの地震応答解析を実施することで、脆弱性評価手法への展開について検討した。

地震応答解析では、有限要素法を用いることとして、原子力分野の衝突問題などの動解析で実績のある汎用コードLS-DYNAを採用した。

解析対象は、図 3. 1. 2-12(a)に示す振動試験で用いた1カラム6PVCブロック及び3カラム6PVCブロックとした。有限要素モデル化の範囲は、図 3. 1. 2-12(b)に示すPVCブロック、上下側板及び上下プレナムブロックとした。図 3. 1. 2-12(c)にPVCブロックモデル化の詳細を示す。表 3. 1. 2-1は有限要素モデルの概要である。

解析において適用する材料特性を表 3. 1. 2-2に示す。令和5年度の解析では全ての部材を剛体としたので、材料物性値としては密度のみが必要となる。また、縦弾性係数、ポアソン比などは、黒鉛ブロックと側板面との接触におけるペナルティ剛性の算出に用いた。また反発係数 R と減衰係数 h の関係は式(3. 1. 2-1)のようになる⁽²⁾。

$$h = \sqrt{\frac{(\ln R)^2}{(\ln R)^2 + \pi^2}} \quad (3. 1. 2-1)$$

摩擦係数 μ_c は相対速度 V_{rel} に依存する形で式(3. 1. 2-2)のように設定した。

$$\mu_c = FD + (FS - FD)e^{-D |V_{rel}|} \quad (3. 1. 2-2)$$

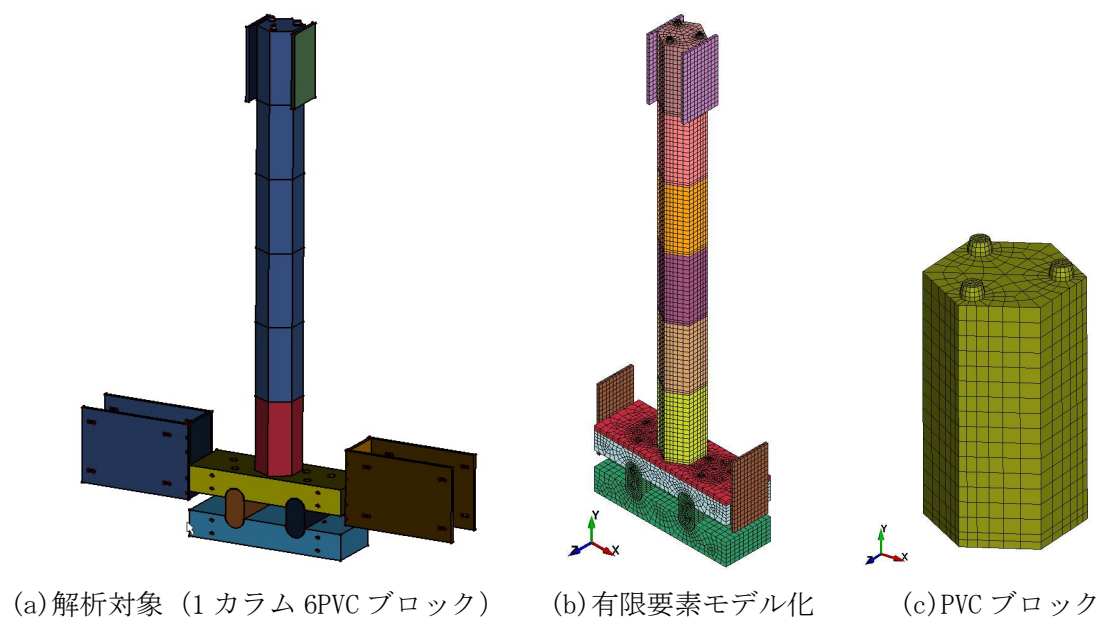


図 3. 1. 2-12 解析対象と有限要素モデル化

表 3. 1. 2-1 有限要素モデルの概要

剛体要素のタイプ	剛体要素の数	節点数
6 面体ソリッド要素	36, 351	46, 204

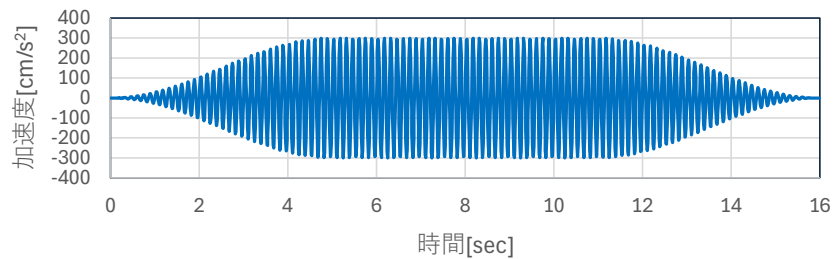
表 3. 1. 2-2 材料特性

項目	記号	単位	ブロック (PVC)	側板 (アルミニウム)
密度	ρ	ton/mm ³	1.35×10^{-9}	2.7×10^{-9}
縦弾性率	E	MPa	2.8×10^3	7.0×10^4
ポアソン比	ν	—	0.37	0.35
静止摩擦係数	FS	—	0.41	0.82
動摩擦係数	FD	—	0.025	0.058
指数減衰係数	DC	s/mm	100	100
反発係数	e	—	0.95	0.997

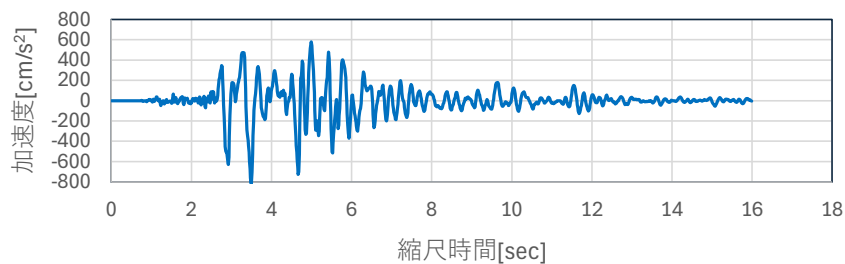
ここで、 FD 、 FS 、 DC はそれぞれ静止摩擦係数、動摩擦係数、指数減衰係数である。解析に用いた加速度波形である神戸海洋気象台（以降，JMA 神戸）南北（以降，JMA 神戸 NS）方向地震動波形⁽³⁾を図 3.1.2-13 に示す。地震波は、振動試験と同様に試験体の相似則に従って時間を圧縮した。

図 3.1.2-14 に解析モデルの概要を示す。解析はプレナムブロック固定の有無（固定有り Model-#01 と固定無し Model-#02）、PVC ブロックカラム数違い（固定有り Model-#03）、振動波形（7 Hz 正弦波加速度、JMA 神戸地震加速度、変位波形）、加振点が異なる計 10 ケースを実施した。

プレナムブロック固定有の応答解析モデル（Model-#01）について、JMA 神戸 NS の加速度入力時の時刻歴応答解析を、代表的なケースとして以下に示す。図 3.1.2-15 に応



(a) 振動数 7 Hz の正弦波形



(b) 地震波（神戸海洋気象台 NS 方向）⁽³⁾

図 3.1.2-13 入力地震動加速度波形

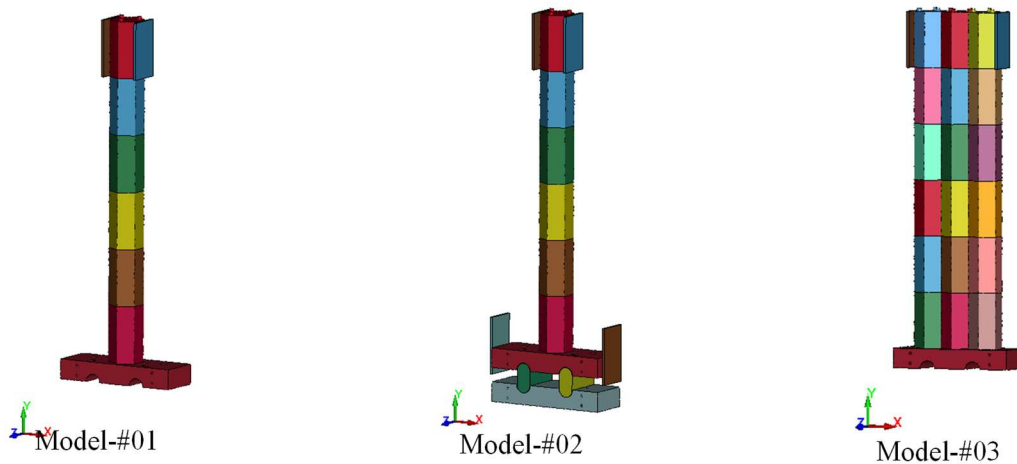


図 3.1.2-14 解析モデルの概要

答が大きい時間帯における応答のスナップショットを示す。各ブロックの重心位置の水平方向の相対変位の時刻歴応答について、令和4年度に実施した振動台実験結果と比較した結果を図3.1.2-16に示す。応答解析結果は、一部を除き実験結果とよく一致しており、おおむね妥当な応答解析モデルの構築ができたことを確認した。

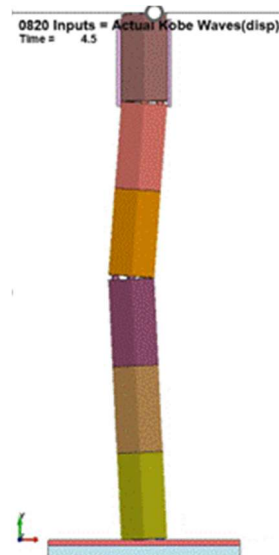


図 3.1.2-15 JMA 神戸 NS の加速度入力時の応答のスナップショット

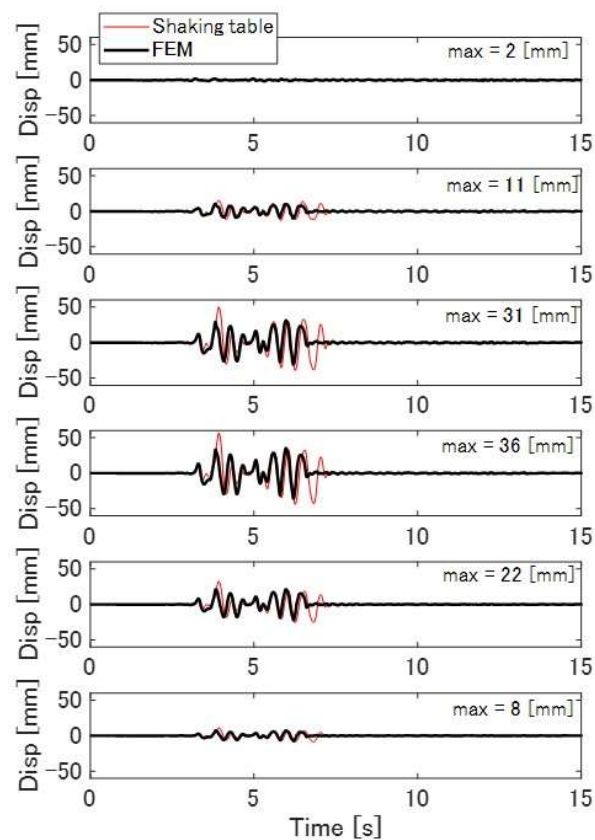


図 3.1.2-16 JMA 神戸 NS の加速度入力時のブロック重心位置の相対変位の時刻歴応答
(図の位置がブロックの位置と対応)

【R6】

令和 5 年度に開発した確率論的に多数の地震動加速度時刻歴波形を生成する手法を拡張し、新型炉の立地地点における地震動波形を生成する確率論的地震動ハザード評価手法を確立した。確立した手法を用いて確率論的地震動生成システムを構築し、妥当性を検証した。

具体的には、次の(1)、(2)を実施した。

(1) 地震動加速度時刻歴波形を基本とする確率論的地震動ハザード評価手法の開発

具体的には、地震動生成モデルを用いて確率論的地震ハザード評価を高度化する手法として、あるサイト \mathbf{s} における地震動時刻歴データ \mathbf{g} の確率分布 $p(\mathbf{g}|\mathbf{s})$ について、地震動生成モデルを用いた定式化を行った。

$$p(\mathbf{g}|\mathbf{s}) = \int \int p(\mathbf{g}|\mathbf{m}, \mathbf{r}, \mathbf{s}) p(\mathbf{r}|\mathbf{m}, \mathbf{s}) p(\mathbf{m}|\mathbf{s}) d\mathbf{m} d\mathbf{r} \quad (3.1.2-3)$$

ここで、 \mathbf{g} 、 \mathbf{m} 、 \mathbf{r} 、 \mathbf{s} は地震動時刻歴データ、震源特性、伝播経路特性、サイト特性を表す。また、 $p(\mathbf{g}|\mathbf{m}, \mathbf{r}, \mathbf{s})$ は、震源特性 \mathbf{m} 、伝播経路特性 \mathbf{r} 、サイト特性 \mathbf{s} の条件下での地震動時刻歴データの確率分布であり、 $p(\mathbf{r}|\mathbf{m}, \mathbf{s})$ は、サイト \mathbf{s} における震源特性 \mathbf{m} に対する伝播経路特性 \mathbf{r} の確率分布である。また、 $p(\mathbf{m}|\mathbf{s})$ は、サイト \mathbf{s} における震源特性 \mathbf{m} の確率分布である。式(1)の積分計算はモンテカルロサンプリングにより実施する。すなわち、地震動時刻歴データ \mathbf{g} の確率分布 $p(\mathbf{g}|\mathbf{s})$ は地震動時刻歴データの集まりとして表現される。

地震動生成モデルは、実用性を考え、令和5年度のモデル2を簡略化し、次の3個の値をラベルとして学習した。

1. モーメントマグニチュード M_W
2. 断層最短距離 R_{rup} [km]
3. 表層から深さ 30 m までの平均 S 波速度 V_{S30} [m/s]

初期検討を踏まえ、512 次元の正規乱数を入力として地震動時刻歴データ $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^{8192}$ (0.01 秒刻みの 81.92 秒のデータ) とその特性を表すベクトル $[M_W, R_{rup}, V_{S30}]^T$ を生成するモデル化を採用した。図 3.1.2-17 に生成された地震動時刻歴波形の例を示す。生成された条件ラベルの分布を学習データのラベルの分布と比較した結果を図 3.1.2-18 に示す。生成された条件ラベルの分布は、学習データとおおむね一致している。

次に、確率論的地震ハザード評価について、単純な例題として、領域震源（ある領域内でランダムに発生する地震）を想定した評価を行う。サイト周辺の深さ 15 km、半径 55 km の同心円状の領域を考え、マグニチュード 5.5 以上の地震がグーテンベルグ・リヒター則に従うとし、年平均発生頻度を 0.5 回、b 値（大きい地震ほどどの程度発生頻度が少なくなるかを表す定数）を 0.9、最小マグニチュードを 5.5、最大マグニチュードを 6.8 とし、評価期間 50 年間での地震ハザード評価を行った。評価地点の平均 S 波速度 V_{S30} を 356 m/s とする。

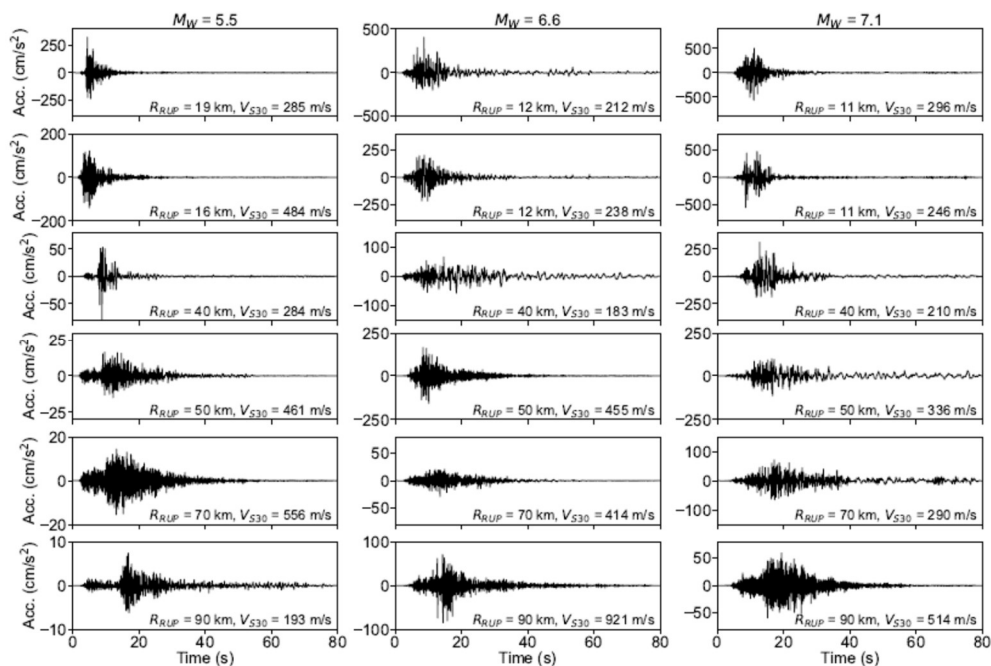


図 3.1.2-17 生成された地震動時刻歴波形の例

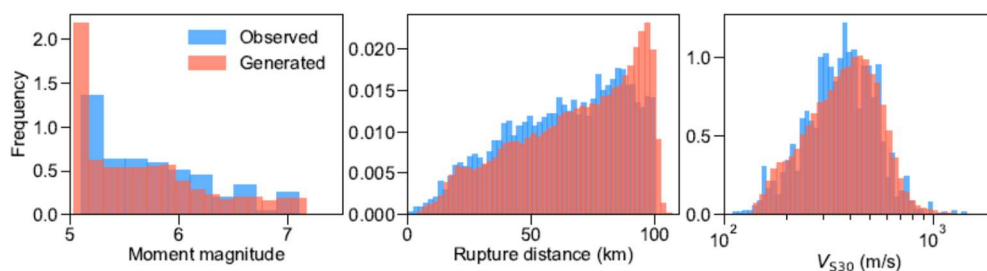


図 3.1.2-18 生成された条件ラベル (M_W, R_{rup}, V_{S30}) の分布と学習データの比較

提案手法では、地震ハザード $p(\mathbf{g}|\mathbf{s})$ を地震動時刻歴波形の集合として表現する。生成した地震動時刻歴波形の中からランダムに 1000 波を抽出した結果を図 3.1.2-19 に示す。各波形の時刻 0 の座標が、対応するモーメントマグニチュード M_W と断層最短距離 R_{rup} の値に対応している。解析結果の妥当性を確認するため、地表面最大速度を指標とする地震ハザード曲線を求め、地震調査研究推進本部の手法で求めた結果と比較した。結果を図 3.1.2-20 に示す。両者はおおむね一致することを確認した。一方、提案手法の方がやや過小評価となった。別途行った検討から、学習データの特徴に起因する差が、両者の結果の差が生じた主な原因であると考えられる。加えて、特に地震規模が大きく距離が小さい領域を含め、学習データが不足する領域のモデルの誤差に起因する部分もあると考えられる。

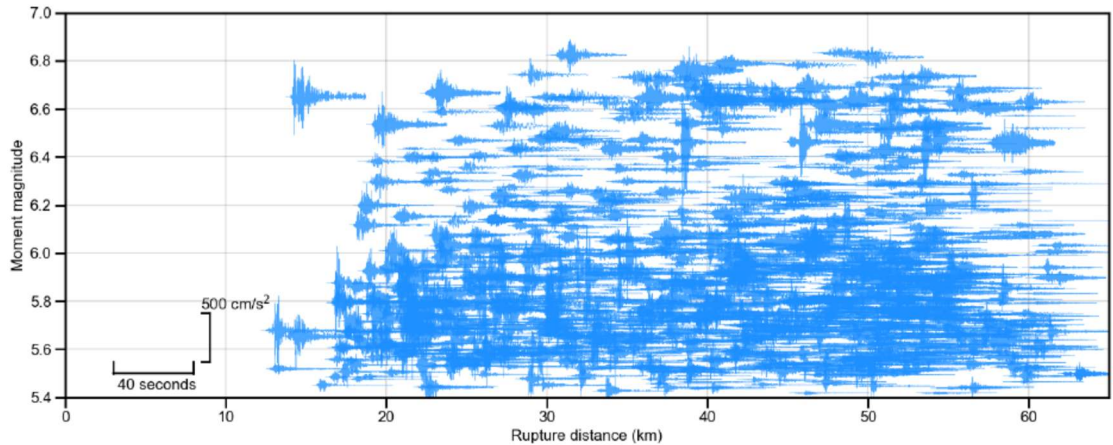


図 3.1.2-19 地震ハザード $p(\mathbf{g}|\mathbf{s})$ の例

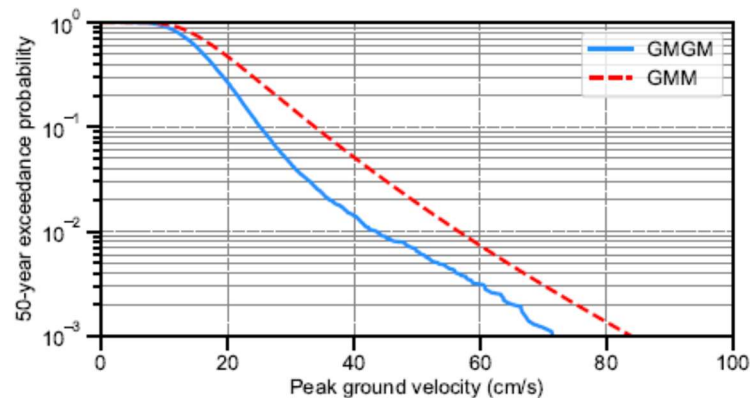


図 3.1.2-20 地表面最大速度に関する地震ハザード曲線の評価結果

(2) 炉内構造物の応答解析を用いた脆弱性評価手法への展開

令和 5 年度の検討結果を踏まえ、StyleGan2 の中間潜在空間を UMAP で次元圧縮したものと StyleGan2 で生成する地震動から求まる地震動強さを多出力ガウス過程の説明変数とする地震応答解析の代替モデル（図 3.1.2-21）を構築し、その有効性を確認する。手法の有効性の検討を行うことから、地震応答解析モデルは、固有周期 0.5 秒、減衰定数 0.05 の一自由度系とし、その最大相対変位と最大絶対加速度の代替モデルを多出力ガウス過程回帰により構築した。多出力ガウス過程回帰は Python ライブラリ GPyTorch を使い、Adam を用いて最適化した。

100,000 ケースの地震動とその中間潜在変数を生成し、その中からランダムに選択した 1,000 ケースを学習用データ、500 ケースを検証用データ、残りの 98,500 ケースをテストデータとした。検証用データの応答と代替モデルの予測値を比較した結果を図 3.1.2-22 に示す。地表面最大加速度のみを説明変数とする場合と比較して、中間潜在変数と地表面最大加速度の両方を説明変数とする場合の方が、検証用データの応答と代替モデルの予測値が一致している。中間潜在変数は、最大振幅を 1 に基準化した加速度時刻歴波形を次元圧縮したものと考えられ、経時特性の影響を含むため、中間潜在変数と地表面最大加速度の両方を説明変数とする場合の方が、予測精度が向上すると考えられる。

参考文献

- (1) Karras T., Laine S., Aittala M., Hellsten J., Lehtinen J., Aila T. (2020). Analyzing and improving the image quality of stylegan, In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition: 8110-8119.
- (2) McInnes, L., Healy, J., Melville, J. (2018). Umap: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction, arXiv preprint arXiv:1802.03426.
- (3) 大町達夫・荒井靖士：個別要素法で用いる要素定数の決め方について、構造工学論文集, Vol. 32A, 1986
- (4) https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html
(参照：2024-03-01)

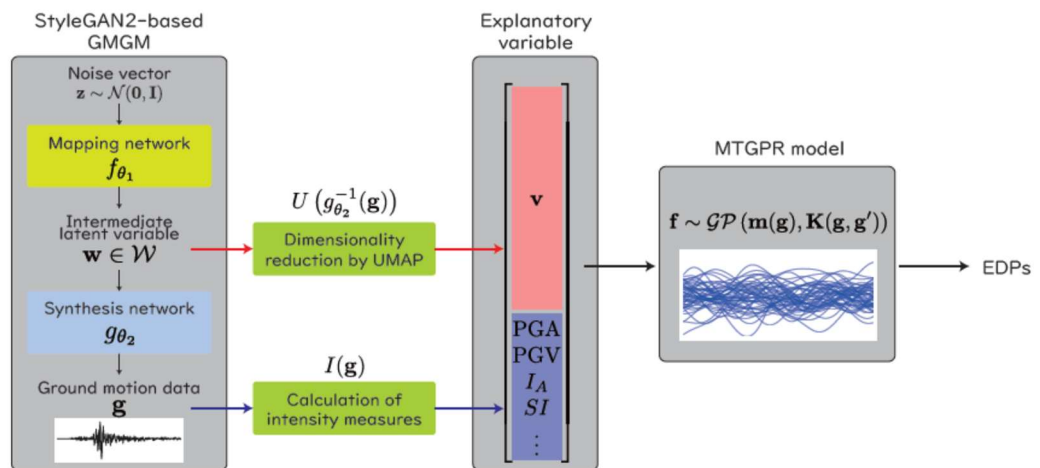
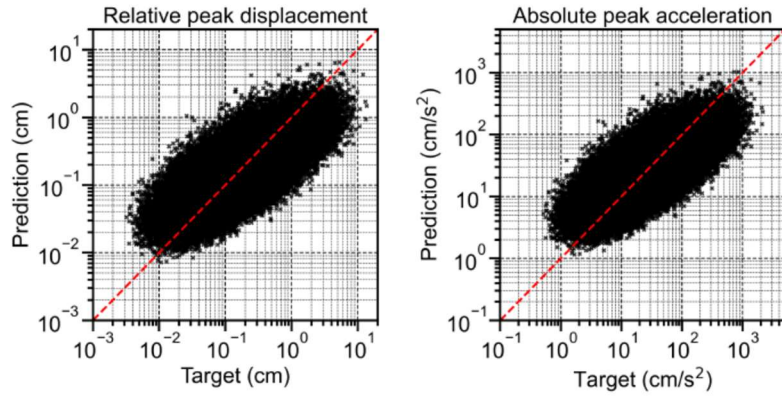
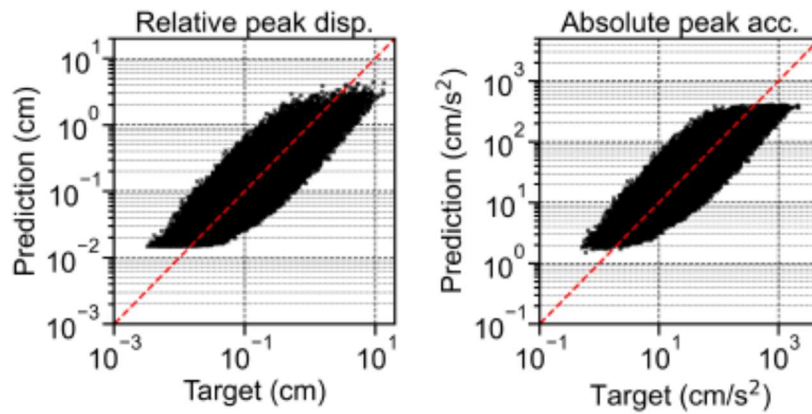


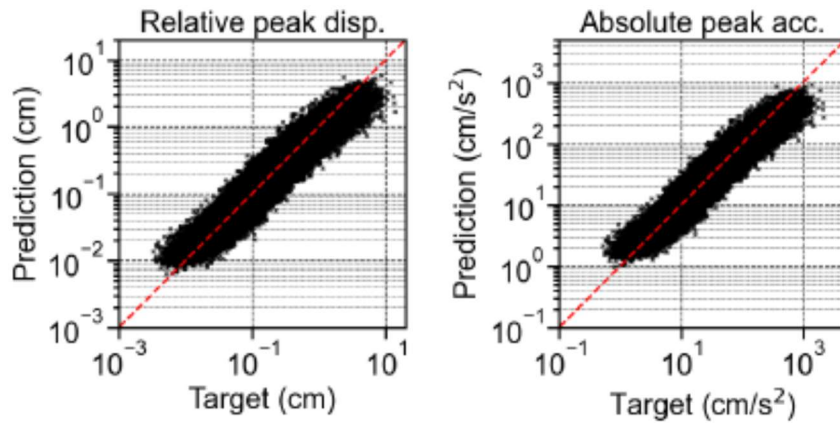
図 3. 1. 2-21 提案する代替モデルの概要



(a) 中間潜在変数のみを説明変数とする場合



(b) 地表面最大加速度のみを説明変数とする場合



(c) 中間潜在変数と地表面最大加速度の両方を説明変数とする場合

図 3.1. 2-22 検証用データの応答と代替モデルの予測値の比較

(左：最大相対変位、右：最大絶対加速度)

3.2 プラントライフサイクルにおけるデータ収集・更新システムの構築 【R4-R6】

3.2.1 振動試験の実施（再委託先：新潟工科大学）【R4-R6】

【R4】

令和4年度は、実構造物と同じ地震動による応力状態等を模擬可能な相似則を踏まえた振動試験計画の策定及び試験体の検討を行い、振動台試験を試実施した。また、振動試験のデータ取得と革新的な実験データ取得方法の検討を行った。

具体的には、まず、相似則、試験体、計測に関する検討を行った。

(1) 相似則

実構造物と同じ地震動による応力状態等を模擬可能な相似則を踏まえた振動試験計画の策定及び試験体の検討を行い、振動台試験を試実施した。また、振動試験のデータ取得と革新的な実験データ取得方法の検討を行った。

具体的には、まず、文献(1)を参考に、相似則を踏まえた試験体の検討を行った。

慣性力、応力による力（弾性力）を対象に、これらの力の比率をパイナンバー π とする

(2)。模型が原型と相似になるための条件式は、

$$q^* = \frac{q_1}{q'_1} = \frac{q_2}{q'_2} = \dots = \frac{q_i}{q'_i} = \dots = \frac{q_r}{q'_r} = \dots = \frac{q_n}{q'_n} \quad (3.2.1-1)$$

となる。 q は現象に関するすべての物理量を示す。

この式を書き換えると、

$$\frac{q_i}{q_r} = \frac{q'_i}{q'_r} \quad (3.2.1-2)$$

となる。ここに $1 \leq i \leq n$ 、 $1 \leq r \leq n$ （ただし $i \neq r$ ）、 q_i/q_r の比をパイナンバーと呼び、ギリシャ文字 π で表わす。パイナンバーで相似の条件を表せば、

$$\pi = \pi' \quad (3.2.1-3)$$

である。ここに π は原型のパイナンバーであり、 π' は模型に対応するパイナンバーである。

ここで、幾何学的相似則を長さ l_m について、

$$l_m = \frac{1}{\lambda} l_p \quad (3.2.1-4)$$

のように設定すると、変位 x_m の相似則も同様に

$$x_m = \frac{1}{\lambda} x_p \quad (3.2.1-5)$$

となる。ここで、 λ は縮尺比、添字 p ：原型、 m ：模型である。

振動台試験の模型で相似則として考慮するのは黒鉛ブロックに作用する慣性力と弾性力である。したがってパイナンバー π は、

$$\pi = \frac{F_i}{F_e} = \frac{\rho l^2}{\varepsilon E t^2} \quad (3.2.1-6)$$

である。式(3.2.1-6)の導出には、慣性力 F_i と弾性力 F_e は、

$$F_i = m\alpha = \rho \frac{l^4}{t^2} \quad (3.2.1-7)$$

$$F_e = \sigma l^2 = E l^2 \varepsilon \quad (3.2.1-8)$$

であることを用いている。 m は質量、 α は加速度、 σ は応力、 l は代表長さ、 t は時間、 ρ は密度、 E は弾性係数、 ε はひずみである。模型と原型のピナナンバーを一致させると、

$$\pi_p = \pi_m \quad (3.2.1-9)$$

から、式(3.2.1-6)より

$$\frac{\rho_m l_m^2}{\varepsilon_m E_m t_m^2} = \frac{\rho_p l_p^2}{\varepsilon_p E_p t_p^2} \quad (3.2.1-10)$$

となる。

時間 t_m の相似則について、式(3.2-10)を整理して書き換えると、

$$\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_m}\right) \left(\frac{\rho_m}{\rho_p}\right) \left(\frac{l_m}{l_p}\right)^2 \left(\frac{E_p}{E_m}\right) = \left(\frac{t_m}{t_p}\right)^2 \quad (3.2.1-11)$$

となる。ひずみは無次元でそれ自体ピナナンバーであることを考慮すれば⁽²⁾、 $\varepsilon_m = \varepsilon_p$ として、

$$\left(\frac{\rho_m}{\rho_p}\right) \left(\frac{l_m}{l_p}\right)^2 \left(\frac{E_p}{E_m}\right) = \left(\frac{t_m}{t_p}\right)^2 \quad (3.2.1-12)$$

また、

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{l_m}{l_p} \quad (3.2.1-13)$$

であるので、

$$t_m = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{\rho_m}{\rho_p}\right) \left(\frac{E_p}{E_m}\right)} t_p \quad (3.2.1-14)$$

となる。

速度 v_m の相似則については、

$$\frac{v_m}{v_p} = \left(\frac{l_m}{l_p}\right) \left(\frac{t_p}{t_m}\right) = \left(\frac{l_m}{l_p}\right) \left(\frac{t_p}{t_m}\right) = \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{\rho_m}{\rho_p}\right) \left(\frac{E_p}{E_m}\right)}} = \sqrt{\left(\frac{\rho_p}{\rho_m}\right) \left(\frac{E_m}{E_p}\right)} \quad (3.2.1-15)$$

となり、整理すると

$$v_m = \sqrt{\left(\frac{\rho_p}{\rho_m}\right)\left(\frac{E_m}{E_p}\right)} v_p \quad (3.2.1-16)$$

加速度 α_m の相似則については、パイナンバーを、加速度 α を用いて書き換える。

$$\pi = \frac{F_i}{F_e} = \frac{\rho l \alpha}{\varepsilon E} \quad (3.2.1-17)$$

模型と原型でパイナンバーは変わらないから、

$$\frac{\rho_m l_m \alpha_m}{\varepsilon_m E_m} = \frac{\rho_p l_p \alpha_p}{\varepsilon_p E_p} \quad (3.2.1-18)$$

となる。これより、

$$\frac{\alpha_m}{\alpha_p} = \left(\frac{\rho_p}{\rho_m}\right)\left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p}\right)\left(\frac{E_m}{E_p}\right)\left(\frac{l_p}{l_m}\right) \quad (3.2.1-19)$$

ここで、

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} = 1 \quad (3.2.1-20)$$

$$\frac{l_p}{l_m} = \lambda \quad (3.2.1-21)$$

より、

$$\alpha_m = \lambda \left(\frac{\rho_p}{\rho_m}\right)\left(\frac{E_m}{E_p}\right) \alpha_p \quad (3.2.1-22)$$

力 F_m （応力による力）の相似則については、

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{\sigma_m l_m^2}{\sigma_p l_p^2} = \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p}\right)\left(\frac{E_m}{E_p}\right)\left(\frac{l_m}{l_p}\right)^2 \quad (3.2.1-23)$$

ここで、

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} = 1 \quad (3.2.1-24)$$

$$\left(\frac{l_m}{l_p}\right)^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (3.2.1-25)$$

より

$$F_m = \frac{1}{\lambda^2} \left(\frac{E_m}{E_p}\right) F_p \quad (3.2.1-26)$$

となる。

応力 σ_m の相似則については、

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \frac{\varepsilon_m E_m}{\varepsilon_p E_p} \quad (3.2.1-27)$$

ここで、

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} = 1 \quad (3.2.1-28)$$

より、

$$\sigma_m = \left(\frac{E_m}{E_p} \right) \sigma_p \quad (3.2.1-29)$$

となる。

ばね定数 k_m の相似則については、

$$\frac{k_m}{k_p} = \frac{F_m l_p}{l_m F_p} \quad (3.2.1-30)$$

ここで、

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{1}{\lambda^2} \left(\frac{E_m}{E_p} \right) \quad (3.2.1-31)$$

$$\frac{l_p}{l_m} = \lambda \quad (3.2.1-32)$$

より、

$$k_m = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{E_m}{E_p} \right) k_p \quad (3.2.1-33)$$

となる。

質量 m_m の相似則については、

$$\frac{m_m}{m_p} = \frac{\rho_m}{\rho_p} \left(\frac{l_m}{l_p} \right)^3 \quad (3.2.1-34)$$

より、

$$m_m = \frac{1}{\lambda^3} \frac{\rho_m}{\rho_p} m_p \quad (3.2.1-35)$$

となる。

振動数 f_m の相似則については、

$$\frac{f_m}{f_p} = \sqrt{\frac{k_m}{m_m}} \sqrt{\frac{m_p}{k_p}} = \sqrt{\frac{k_m}{k_p}} \sqrt{\frac{m_p}{m_m}} = \sqrt{\frac{1}{\lambda} \frac{E_m}{E_p}} \sqrt{\lambda^3 \frac{\rho_p}{\rho_m}} = \lambda \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_m} \frac{E_m}{E_p}} \quad (3.2.1-36)$$

より、

$$f_m = \lambda \sqrt{\frac{\rho_p E_m}{\rho_m E_p}} f_p \quad (3.2.1-37)$$

となる。

文献(1)の模型実験は、原型と模型で同じグラフアイトを用いている。縮尺比 λ は2である。相似則を考えると、模型の密度 ρ_m を原型 ρ_p の2倍とする必要があるため、中心部に鉛管を設けて密度を調整している。

一方、本研究では、模型の縮尺比 λ は2.5である。式(3.2.1-22)より、加速度 α_p と α_m が等しくなるようにするための、模型の密度 ρ_m は、

$$\rho_m = \lambda \left(\frac{E_m}{E_p} \right) \rho_p \quad (3.2.1-38)$$

となる。塩化ビニルのヤング率と密度は後述のように重合度により異なるが、塩化ビニルと黒鉛の物性として、表 3.2.1-1 の値を仮定すると、加速度の相似則を満たす模型の密度は、1.2[g/cm³]となり、試験体の塩化ビニルの密度 1.3[g/cm³]と近い値となる。なお、塩化ビニルの密度は、黒鉛ブロックの模型の質量の計測値 (3826 g) とその体積 (2843 cm³) から求めた。

また、加速度 α_p と α_m が等しくなるようにするためには

$$\frac{\rho_p E_m}{\rho_m E_p} = \sqrt{2.5} \quad (3.2.1-39)$$

となる必要があり、これを式(3.2.1-14)に代入すると、

$$t_m = \sqrt{\frac{1}{2.5}} t_p \quad (3.2.1-40)$$

が得られる。以上より、令和6年度の実験では、時間軸をこの倍率で変化させることとした。一方、文献(3)によると、塩化ビニルのヤング係数と密度は重合度により、ヤング係数が2.4～4.2 GPa、比重が1.3～1.6程度に分布することにも留意する必要がある。

表 3.2.1-1 黒鉛と塩化ビニルの物性

材料名	ヤング係数 E [GPa]	密度 ρ [g/cm ³]
黒鉛	9.9	1.7
塩化ビニル	2.8	1.3

黒鉛の物性は JAERI-M 85-172 による

塩化ビニルのヤング係数は <https://www.cutpla.com/pvc-personality.html> の引張時を参照

(2) 試験体

振動台の写真を図 3.2.1-1 に示す。最大振幅±200 mm、テーブルサイズ 1500×1500 mm の 3 次元永久磁石地震波振動台である。ブロックの衝突を模擬するための側壁を設置するため左右にアルミ製のフレームを設置した。図 3.2.1-2 に試験体と計測の概要を示す。図に赤色で示す位置に加速度計を設置し、振動台側面には振動台の変位を計測するためのレーザ変位計を設置した。また、変位計測には高速度カメラを用い、デジタル画像相関法⁽¹⁾⁽⁴⁾により、各部位の変位の時刻歴波形を求めることとした。

MEMS 型加速度計は MEMS 加速度センサ ADXL355 を取り付けた基板を ESP32 マイクロプロセッサと SPI により接続している。サンプリング周波数を 125 Hz、計測レンジを±2.0 G とした。加速度は 3 軸で計測され、計測データは加速度計から Wi-Fi 経由で MQTT プロトコルを通じて、随時サーバ PC に送信される。NTP クライアントが作動しており、データはタイムスタンプとともにサーバに送信される。

水平 1 方向の入力加振波としては、ホワイトノイズ、正弦波 (7 Hz)、1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸 NS を用いた。水平 1 方向及び鉛直方向の入力加振波としては、1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸 NS と JMA 神戸 UD を用いた。なお、前述の通り、JMA 神戸 NS 及び UD は試験体の相似則を考慮して時間軸を原波の $1/\sqrt{2.5}$ 倍としている。図 3.2.1-3 に入力地震動の加速度波形を示す。

(3) 試験結果

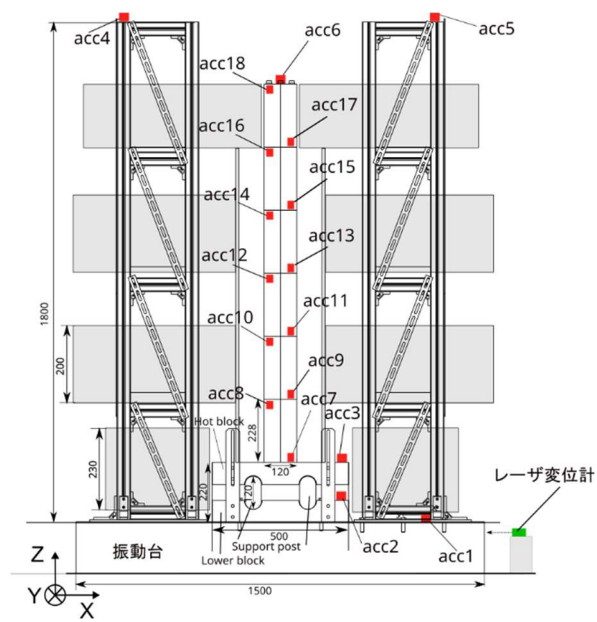
黒鉛ブロックを積み上げた炉内構造物を模擬した試験体を図 3.2.1-4 に示す。振動台試験室の制約から 6 個のブロックを積み上げたモデルとし、最上段のブロックの左右には、約 0.5 mm の隙間を設けたうえで壁面が設けられている。

一例として、JMA 神戸 NS 波で加振した場合のスナップショットを図 3.2.1-5 に、MEMS 型加速度計の計測値から二階積分して求めた最大変位を図 3.2.1-6 に示す。複雑なブロックの挙動であることがわかる。また、各ブロックの重心位置における水平方向の相対変位の時刻歴を図 3.2.1-7 に示す。上から 4 段目のブロックが最も振幅が大きくなっている。次に、最上段のブロックの重心位置における上下方向の相対変位の時刻歴を図 3.2.1-8 に示す。直下のブロックから突き上げられることにより飛び上がり、自由落下するような挙動を繰り返していることがわかる。

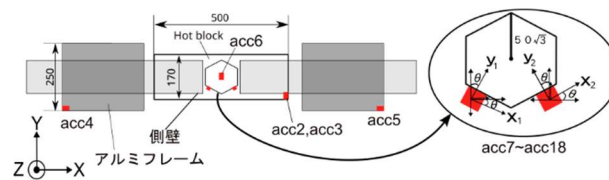


図 3.2.1-1 振動台写真

(サンエス製 3次元永久磁石地震波振動台 SPT3D-15K-85L-50T)

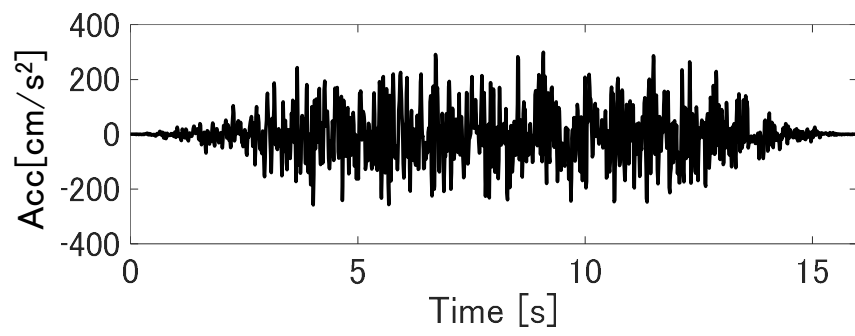


(a) 立面図

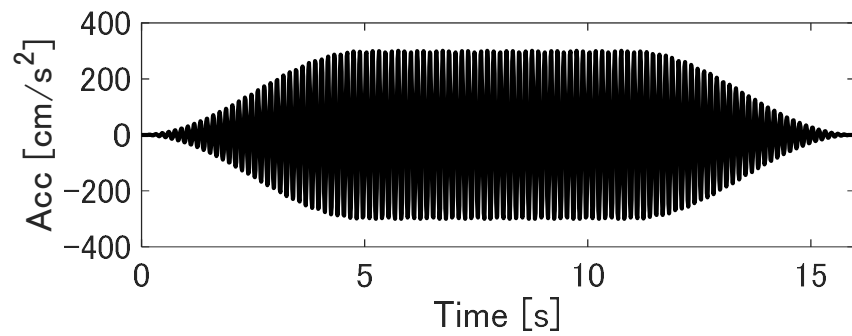


(b) 平面図

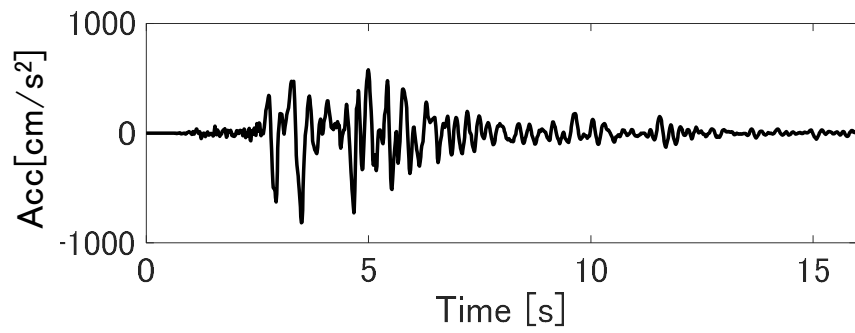
図 3.2.1-2 セットアップとセンサ設置位置[単位:mm]



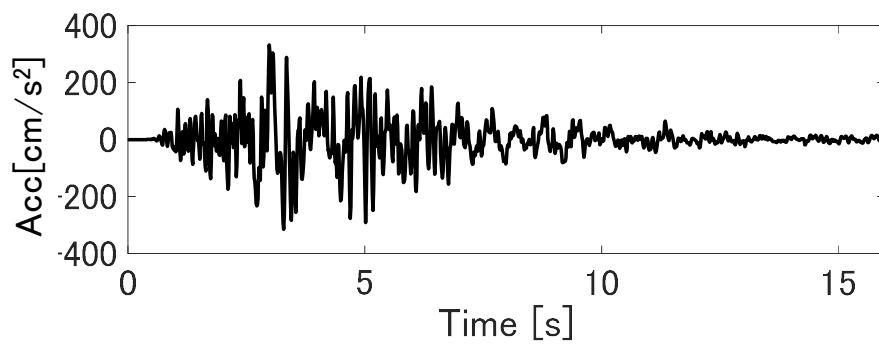
(a) ホワイトノイズ



(b) 正弦波 (7 Hz)

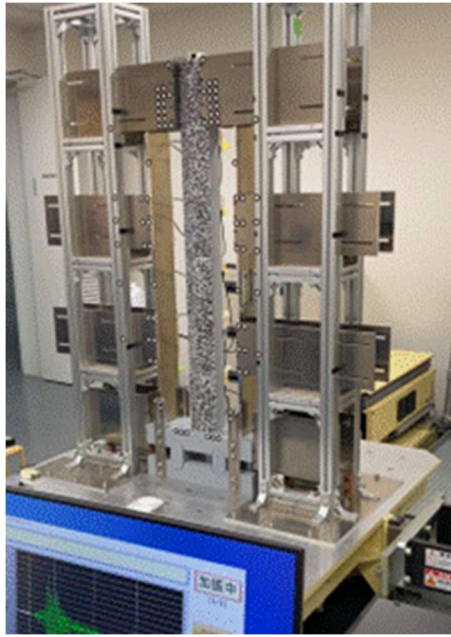


(c) JMA 神戸 NS 波 (相似則考慮)

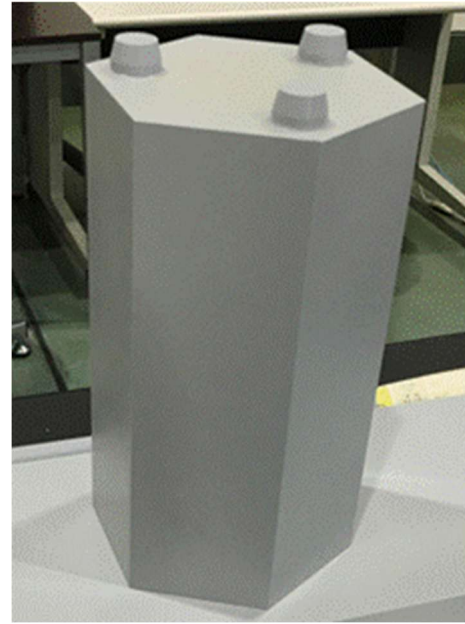


(d) JMA 神戸 UD 波 (相似則考慮)

図 3.2.1-3 加振波



(a) 全景



(b) ブロック

図 3.2.1-4 試験体

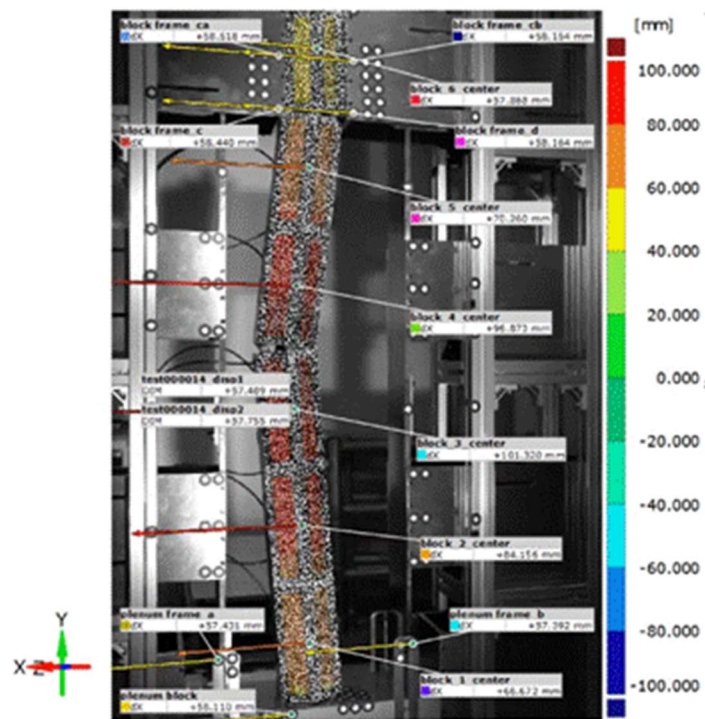


図 3.2.1-5 画像相関法で求めた各部位の変位のスナップショット

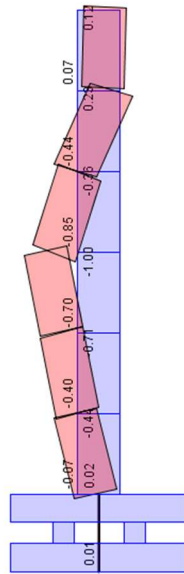


図 3.2.1-6 MEMS 型加速度計で求めた各部位の最大変位
(図中の数値は最大変位 55.46mm で基準化した変位量を表す)

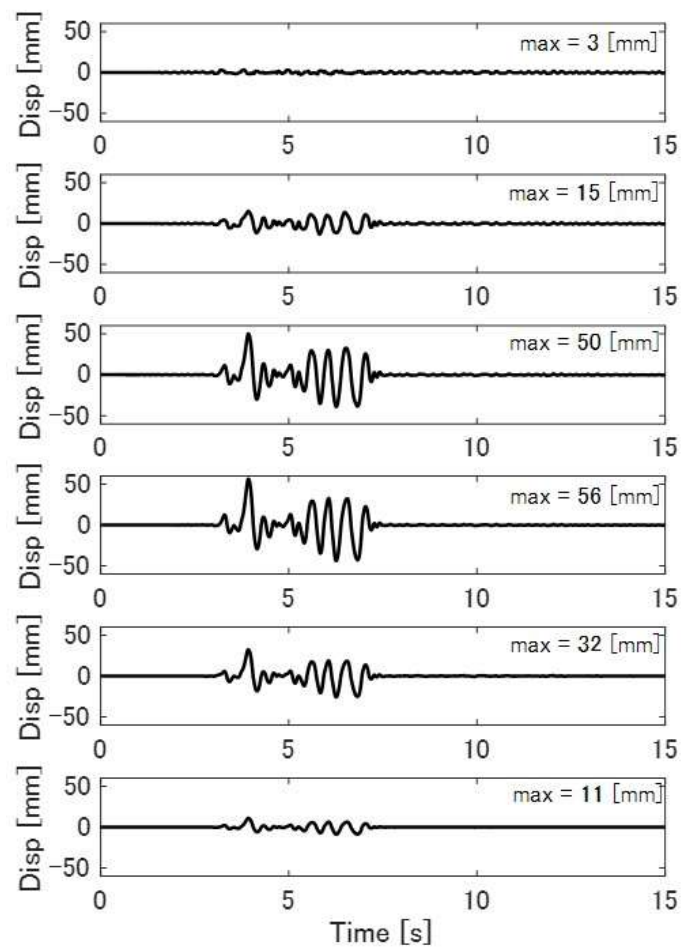


図 3.2.1-7 水平方向の相対変位の時刻歴波形
(上から順番に最上段のブロック、…、最下段のブロック)

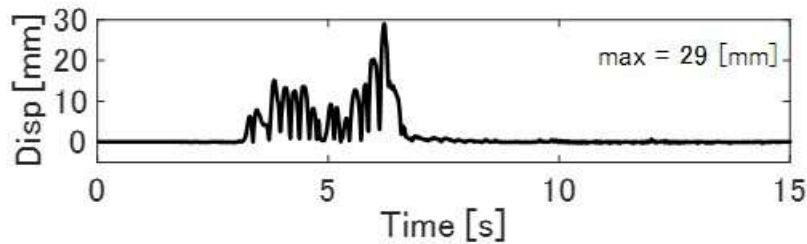


図 3.2.1-8 最上段のブロックの上下方向の相対変位の時刻歴波形

【R5】

令和5年度は、令和4年度に実施した振動試験結果を踏まえて、必要に応じて抽出した事象・シナリオを模擬する振動試験及び試験データ取得方法・システムの課題を検討し、試験体及び振動試験計画に関する改良検討を実施した。改良した炉内構造物の模擬試験体を作製し、新たな振動試験を実施して、データを拡充した。具体的には、次の通りである。

(1) MEMS 型加速度計を用いた変位計測手法に関する検討

令和4年度実施した1コラム模型の振動台実験において、MEMS 型加速度計の加速度計測結果を用いて各ブロックの重心位置におけるプレナムブロックに対する相対変位を算出することで、MEMS 型加速度計を用いた変位計測手法に関して検討した。MEMS 型加速度計では、相互に完全に時刻が同期されていないため、相対変位の算出精度において課題となる。

相対変位はMEMS 型加速度計により得られた加速度記録をカットオフ周波数 f_c のハイパスフィルタをかけたのち二階積分することで算出した。各ブロックには対角線上に2台の加速度計を設置しているため、水平方向、上下方向それぞれの平均値を取ることで重心位置の相対変位とした。なお、相対変位を算出するにあたり、カットオフ周波数の影響が大きいため、ここでは $f_c=0.8$ 、 1.5 、 3.0 Hz とした3パターンについて比較する。プレナムブロックを固定した場合のJMA 神戸 NS 波で加振時の実験結果のうち水平方向変位について、デジタル画像相関法により算出した重心位置の変位との比較の例を図3.2.1-9に示す。デジタル画像相関法による変位についてもプレナムブロックに対する相対変位として算出している。最下段のブロックは、 f_c を 0.8 Hz とした場合にデジタル画像相関法と同様の結果となっており、概ねブロックの挙動を追跡できた。

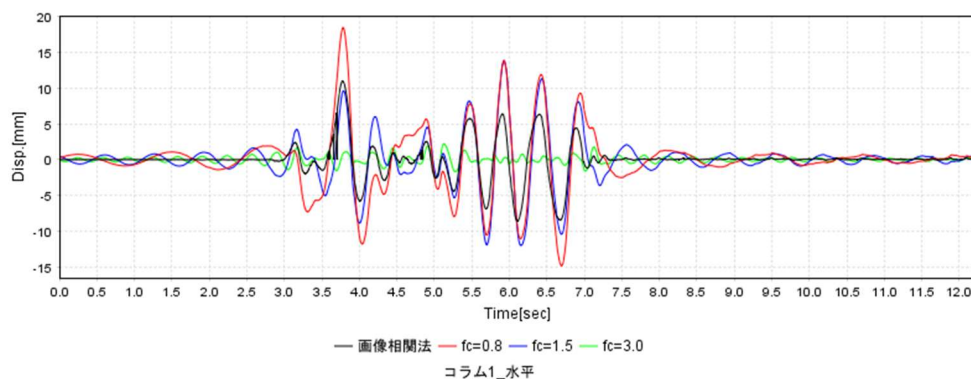


図 3.2.1-9 最下段のブロックの重心位置における相対変位の比較の例
(プレナムブロックを固定とした場合)

(2) 3 コラム試験体の振動台実験の実施

1 コラム模型と同様に塩化ビニルを用い、3 コラム模型を製作した。図 3.2.1-10 に試験体と計測の概要を示す。図に赤色で示す位置に加速度計を設置し、プレナムブロック及び振動台側面には振動台の変位を計測するためのレーザ変位計を設置した。加速度計は1 コラム模型と同様、各ブロックの上側と下側の対角線上に1 台ずつ計2 台設置した。

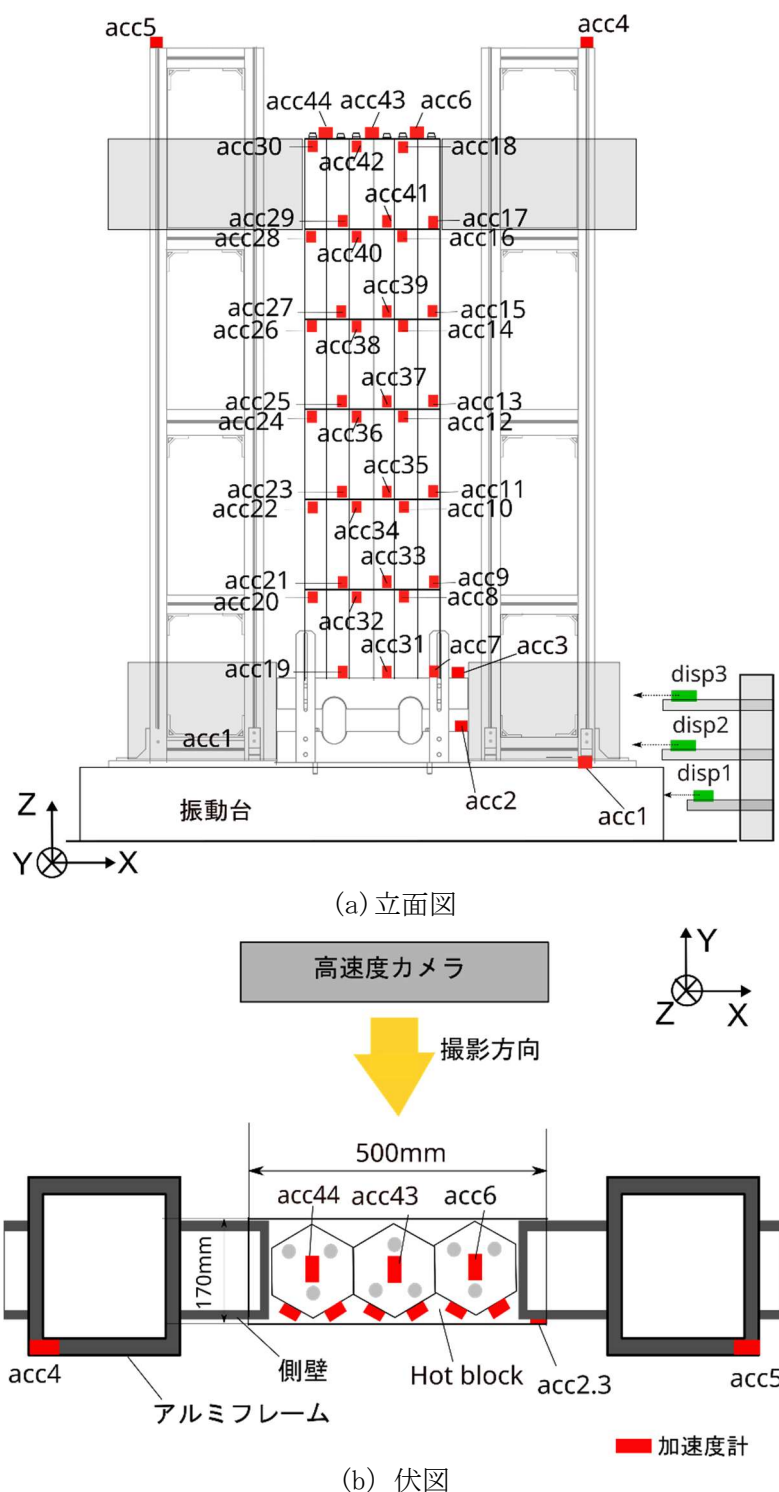


図 3.2.1-10 3 コラム試験体セットアップ概要

入力加振波は 1 コラム模型の振動台実験と同様、水平 1 方向の入力加振波としては、ホワイトノイズ、正弦波（7 Hz）、1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸 NS を用いた。水平 1 方向及び鉛直方向の入力加振波としては、1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸 NS と JMA 神戸上下（UD）を用いた。また、1 コラムの加振について 2 ケース行った。加振ケース一覧を表 3.2.1-2 に示す。

表 3.2.1-2 加振ケース一覧

実験番号	加振波	上部プレナムブロックの固定状況	コラム数
1	ホワイトノイズ	固定	3列
2	ホワイトノイズ	固定	3列
3	1hz	固定	3列
4	1hz	固定	3列
5	7hz	固定	3列
6	7hz	固定	3列
7	10hz	固定	3列
8	10hz	固定	3列
9	10hz	固定	3列
10	JMAKobe NS	固定	3列
11	JMAKobe NS	固定	3列
12	JMAKobe NS1.5倍	固定	3列
13	JMAKobe NS1.5倍	固定	3列
14	ホワイトノイズ	非固定	3列
15	ホワイトノイズ	非固定	3列
16	1hz	非固定	3列
17	1hz	非固定	3列
18	7hz	非固定	3列
19	7hz	非固定	3列
20	10hz	非固定	3列
21	10hz	非固定	3列
22	JMAKobe NS	非固定	3列
23	JMAKobe NS	非固定	3列
24	JMAKobe NS1.5倍	非固定	3列
25	JMAKobe NS1.5倍	非固定	3列
26	JMAKobe NS UD	固定	3列
27	JMAKobe NS UD	固定	3列
28	JMAKobe NS UD1.5倍	固定	3列
29	JMAKobe NS UD1.5倍	固定	3列
30	JMAKobe NS UD	非固定	3列
31	JMAKobe NS UD	非固定	3列
32	JMAKobe NS UD1.5倍	非固定	3列
33	JMAKobe NS UD1.5倍	非固定	3列
34	7hz	固定	3列
35	7hz	固定	3列
36	JMAKobe NS	固定	3列
37	JMAKobe NS	固定	3列
38	7hz	非固定	3列
39	7hz	非固定	3列
40	7hz	非固定	3列
41	JMAKobe NS	非固定	3列
42	JMAKobe NS	非固定	3列
43	7hz	固定	3列
44	JMAKobe NS	固定	3列
45	7hz	固定	3列
46	JMAKobe NS	固定	3列
47	7hz	固定	3列
48	JMAKobe NS	固定	3列
49	JMAKobe NS	固定	1列
50	JMAKobe NS	固定	1列
51	JMAKobe NS1.1倍	固定	3列

(3) MEMS 型加速度計による計測結果と画像計測結果との比較

1 コラム模型の実験と比較して 3 コラム模型の実験では加速度計の設置数が多くなった影響もあり、無線通信による時刻同期やデータ取得に影響が生じたため、加速度計によっては時刻が大きくずれていることが確認された。そこで、位相差分スペクトルを用いて時刻ずれを修正する。図 3.2.1-11 にプレナムブロックに設置した加速度計に対する各ブロックに設置した加速度計の相対加速度について求めたフーリエスペクトルと位相差分スペクトルの例を示す。ここでは水平方向のみの結果であり、黒色が時刻ずれを修正する前、赤色が時刻ずれを修正した後を示している。このとき、 $\Delta\phi(f)$ を周波数 f における位相差分とすると時刻のずれ t_{diff} は

$$t_{\text{diff}} = \frac{\Delta\phi(f)}{2\pi f} \quad (3.2.1-41)$$

として算出できる。ここでは、位相のずれがおおよそ線形となっている 1~5 Hz の範囲において最小二乗法により位相ずれの傾きを求め、位相の傾きがなくなるように時刻補正を行った。

次に、1 コラム模型と同様、MEMS 型加速度計によって得られた計測記録から算出した重心位置の相対変位とデジタル画像相関法で算出した重心位置の相対変位を比較する。プレナムブロックを固定した場合の JMA 神戸 NS 波で加振したときの重心位置の水平方向の変位比較の例を図 3.2.1-12 に示す。図では、カットオフ周波数 f_c を 1.0 Hz として MEMS 型加速度計から求めた変位について、時刻ずれの修正前後を比較している。時刻ずれ修正前の場合では、加速計とデジタル画像相関法の波形は大きく異なる場合があるのに対し、時刻ずれ修正後では、概ねデジタル画像相関法の計測結果と一致した結果となっている。

以上のように、無線通信可能な MEMS 型加速度計を用いた振動実験では、計測器のコストを安く抑えられるため多点計測が可能となるメリットがある一方で、無線通信によるデータ取得では、時刻同期やデータ欠損の課題が見られた。時刻同期については、位相差分スペクトルから時刻ずれを修正することで、概ね重心位置の変位を算出可能であることがわかった。時刻同期の精度向上のためには、加振直前に入力が明確な応答を計測しておくことなどで改善できる可能性がある。

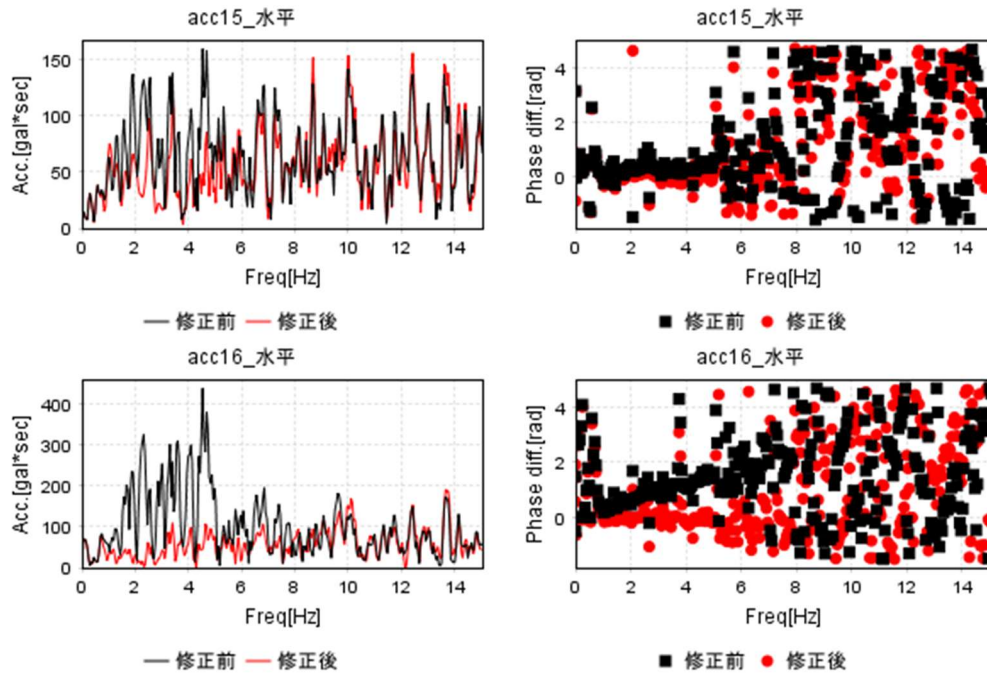


図 3. 2. 1-11 各ブロックの相対加速度のフーリエスペクトルと位相差分スペクトルの例
(プレナムブロックを固定した場合)

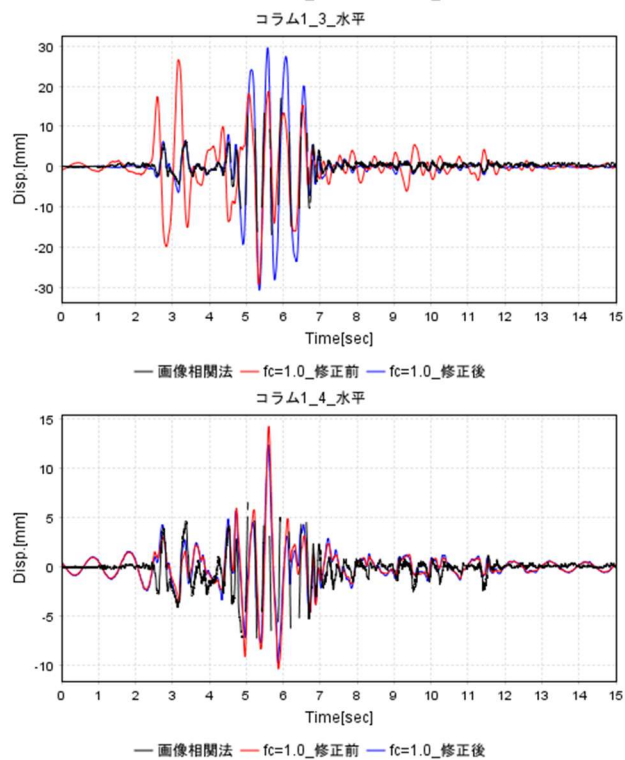


図 3. 2. 1-12 各ブロックの重心位置における相対変位の比較の例
(プレナムブロックを固定した場合)

【R6】

令和 4、5 年度に実施した振動試験結果について再現性を解析するために分析し、分析結果を踏まえて新たな振動試験を実施し、データを取得した。

具体的には次の 3 項目を行った。

(1) 1 コラム模型の再現解析

令和 4、5 年度に実施した振動試験結果について再現性を分析するため、令和 4 年度に実施した 1 コラム模型を対象に、令和 5 年度までに構築した有限要素モデルの改良案の検討を行った。具体的には、ブロックの角が他のブロックに接触して応答の性状が再現できない可能性が考えられたことから、ブロックの角を面取りしたモデル（図 3.2.1-13）を作成した（面取りしないモデルと計 2 パターン）。また、振動台実験の試験体のうちダウエルソケット部分の製作誤差が応答に与える影響も考えられたため、上記 2 モデルに対して、振動台実験の試験体の製作誤差を考慮して、ダウエルソケットの径を 21.6 mm から ± 0.2 mm 増減させたモデル（元のモデルを含めて 3 パターン、面取りの有無を含めると計 6 ケース）を作成した。

図 3.2.1-14 に 7 Hz の正弦波（図 3.1.2-13 参照）での加振時について、面取りの有無による相対変位応答の違いを示す。面取りを行うことで、応答の定常性が向上する様子がうかがえる。一方で、いずれの場合も、応答解析結果と実験結果に乖離がみられ、その要因を今後検討する必要がある。

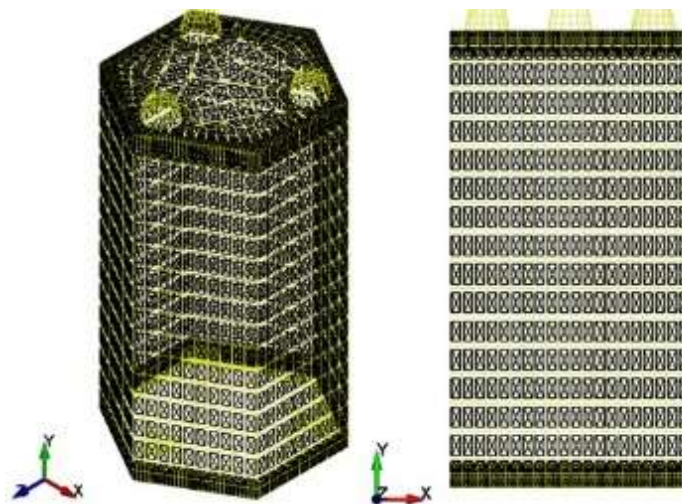


図 3.2.1-13 ブロックの角を面取りしたモデル

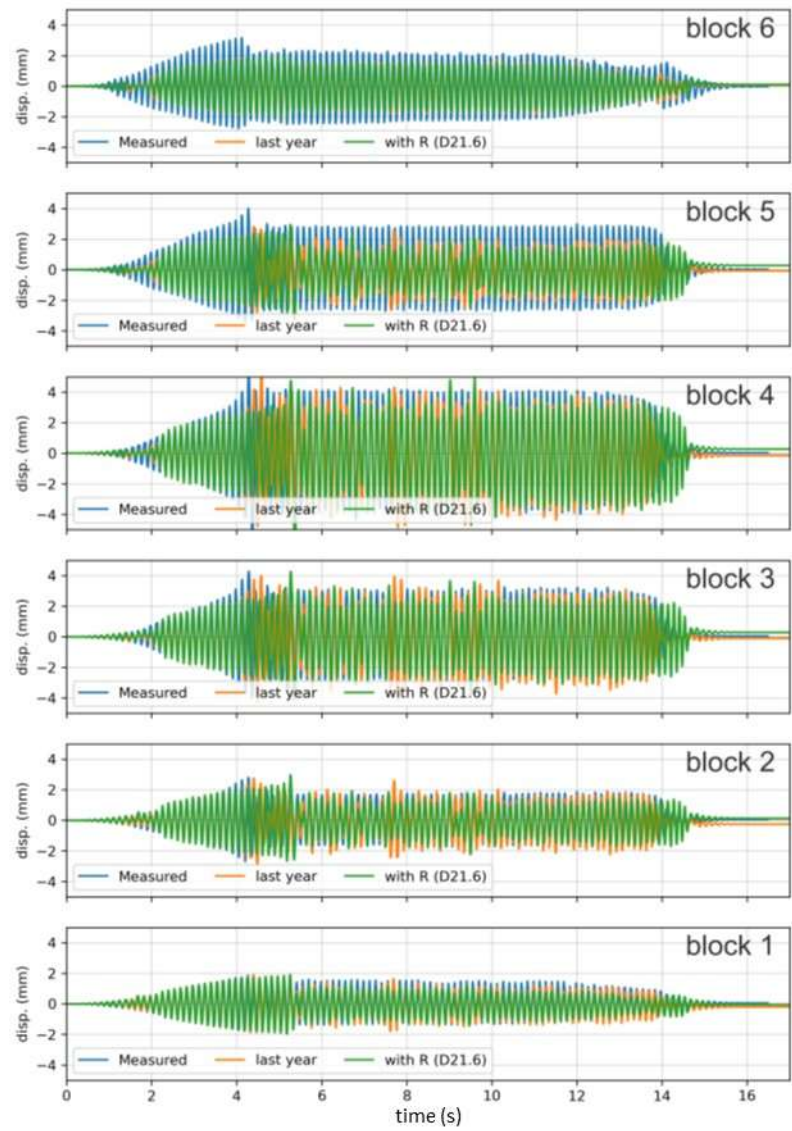


図 3.2.1-14 面取りの有無による応答性状の違い（正弦波 7 Hz による加振）

(2) 3次元プレナムブロックによる振動台実験概要

令和4, 5年度ではブロックを1コラムとした模型及び3コラムとした模型の振動台実験を行った。各ブロックに設置した MEMS 型加速度計から得られた計測記録を用いて、ブロックの重心変位を算出し、画像解析結果により得られた変位と比較した。加速度計測記録を周波数領域で二階積分して得られた重心変位は、画像解析と同様の結果が得られた。しかしながら、プレナムブロックとサポートポストは実状と異なる2次元に挙動する模型を用いている。そこで令和6年度においては、プレナムブロック、サポートポストを3次元とした試験体を用いて、ブロックをコラムとした場合と3コラムとした場合の振動台実験を行い、データを拡充した。これまでに得られた知見から、MEMS 型加速度計による計測データでも各ブロックの重心変位を追跡可能であることがわかっている。そこで令和6年度においては、画像計測を行わず、加速度計測のみとした。3コラム模型の試験体セットアップを図3.2.1-15に例示する。下部プレナムブロック Lower block は振動台にボルトで固定し、3本のサポートポスト(φ60の円柱)を介して Hot block が支持されている。円柱の両端は図中の赤色の□で示した位置に加速度計を設置しており、ブロックはこれまでと同様、ブロック側面の対角線上に1台ずつ、振動台には1台設置している。また、Hot block が3次元的に挙動することを想定し、Hot block 上面の対角線上に1台ずつ設置し、ロッキング挙動などを計測できるようにした。以上計39台の加速度計によってブロック及びプレナムブロックの挙動を追跡する。加速度計はWi-Fi経由でサーバにデータを送信する仕様となっているが、令和5年度は加速度計の台数が多く無線ルーターを2台用いたため、データの収録などに問題が生じた。そこで、令和6年度はメッシュ型の無線ルーターを用いることで安定してデータ収録できるようにした。水平1方向の入力加振波としては、ホワイトノイズ、正弦波(1 Hz, 4 Hz, 7 Hz, 10 Hz)、1995年兵庫県南部地震のJMA 神戸 NSを用いた。水平1方向及び鉛直方向の2方向入力加振波としては、1995年兵庫県南部地震のJMA 神戸 NSとJMA 神戸 UDを用いた。試験体パラメータは、コラム本数が2パターン(1コラム、3コラム)、側壁が有り無しの2パターンの計4パターンである。

(3) MEMS 型加速度計による計測結果

入力波をJMA 神戸 NS波としたコラム数と壁の有無をパラメータとした表3.2.1-3に示す四つの実験IDについて、MEMS 型加速度計によって得られた計測記録から算出した相対変位を比較する。ここでは振動台(acc1)に対する相対変位(relaccjto1)とした。jは図3.2.1-15に示した加速度計の番号2~39である。各ブロック及びHot blockの重心位置のX方向及びZ方向の相対変位から算出した応答形状を図3.2.1-16に示す。図中の応答形状は中央コラム下から3段目のブロックのX方向最大変位時点とし、数値はX方向の変位である。図中の破線は元々のブロックの位置及びHot block、振動台の高さを示している。なお、二階積分する際のカットオフ周波数は1.0 Hzとした。

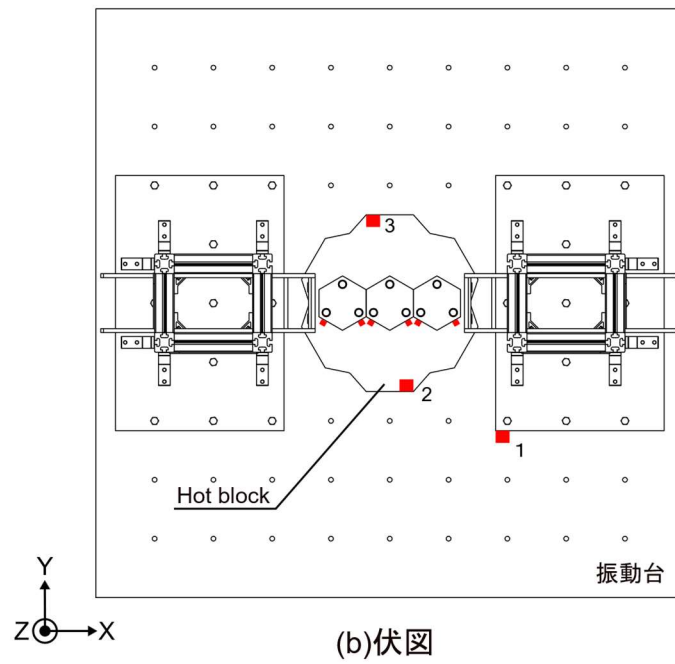
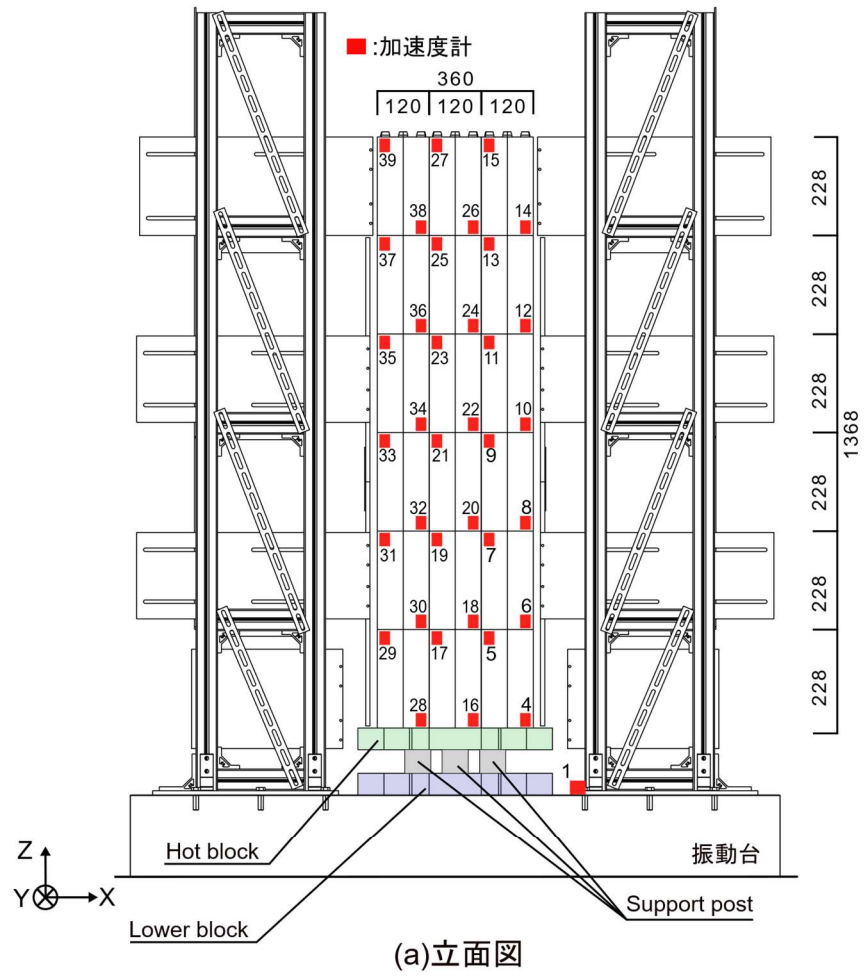


図 3. 2. 1-15 令和 6 年度の振動台実験のセットアップ概要[単位:mm]

カラム数によらず壁有りでは水平変形が小さ一方、壁無しでは2～4段目のブロックの水平変位が大きくなる傾向にある。プレナムブロックの変位はカラム数が1列よりも3列の方が大きくなる傾向が観察された。列数が増えた場合にダウエルピンにかかるせん断力が大きくなった結果、プレナムブロックの変位も大きくなったと考えられる。また、T011の1カラム壁有りでは、下から3段目の変位が極端に大きくなっている。これは令和5年度もあったが、振動台の加速度計に対して位相がずれていることが原因であり、位相を修正することで適正化することが可能である。T052のカラム数3で壁無しの場合、他の実験IDと比べてプレナムブロックや各ブロックの鉛直方向の変位が大きくなる傾向がある。Hot blockに大きなロッキング挙動が生じており、令和5年度までに実施した2次元のモデルでは観察されなかった応答挙動である。

T037とT052の実験IDについて、図3.2.1-17にHot blockに設置した加速度計(acc2, acc3)の振動台に対するX、Y、Z方向それぞれの相対変位時刻歴波形、相対加速度フーリエ振幅スペクトル及び位相差分を示す。位相差分はacc2とacc3の相対加速度フーリエ変換の位相の差分を意味している。T037では3方向とも時刻歴波形は同様の形状を示しており、位相差分もほぼゼロとなっていることから、同位相で振動していることが確認された。特にZ方向については、フーリエ振幅スペクトルも同様の形状となっている。一方、T052ではX、Y方向では概ね同様の時刻歴波形となっているものの、Z方向においては10～13秒付近で波形が大きく異なっていることがわかる(図中の黒枠)。今回、Hot block上面の対角線上に設置した2台の加速度計は、X方向の位置が近すぎたため、実験時に観察された挙動ほど明確なロッキング挙動は観察しづらい結果となった。加速度計をよりX方向に離れた位置に設置することで、より明確にロッキング挙動を追跡できる可能性がある。

参考文献

- (1) 日本原子力研究所：垂直二次元炉心モデルによる高温ガス炉の炉心耐震試験と解析，日本原子力研究所報告書 JAERI 1282，1983
- (2) 江守一郎・D. J. シューリング：模型実験の理論と応用，技報堂，1973（昭和48年）
- (3) 塩ビ工業・環境協会、https://www.vec.gr.jp/enbi/enbi2_2.html
- (4) Sutton, M., Orteu, J., Schreier, H. (2009). Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009.

表 3. 2. 1-3 実験諸元

実験 ID	カラム	壁	入力波
T011	1	有り	JMA 神戸 NS 波
T022	1	無し	
T037	3	有り	
T052	3	無し	

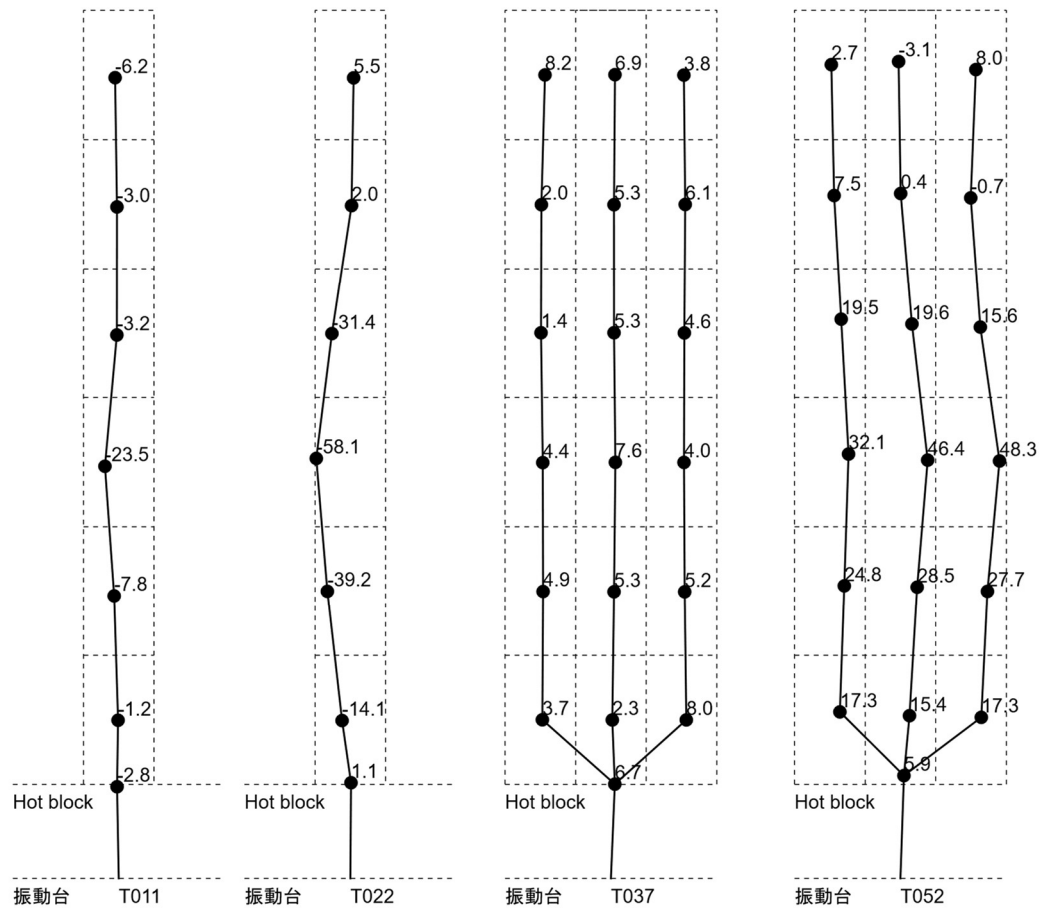
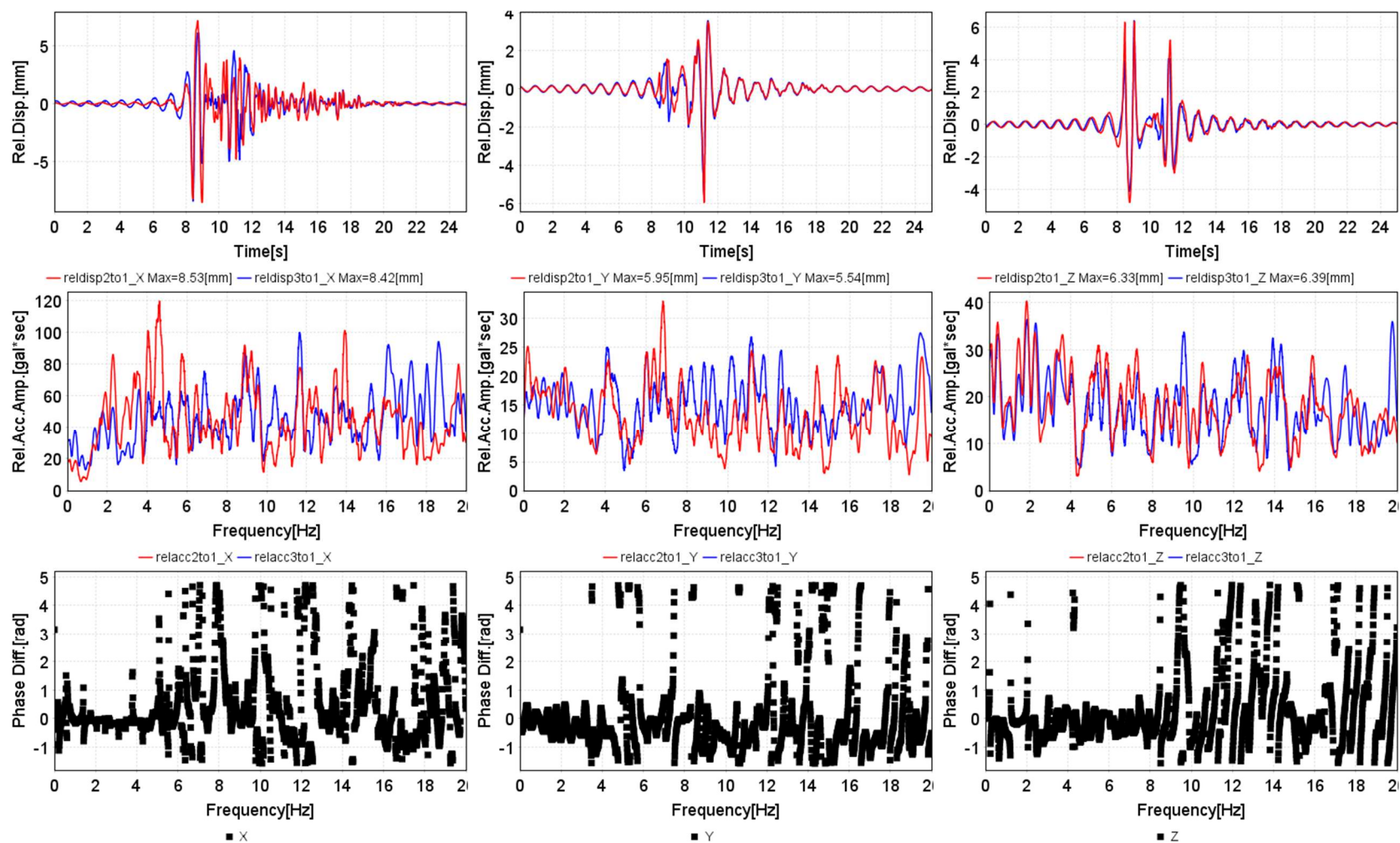
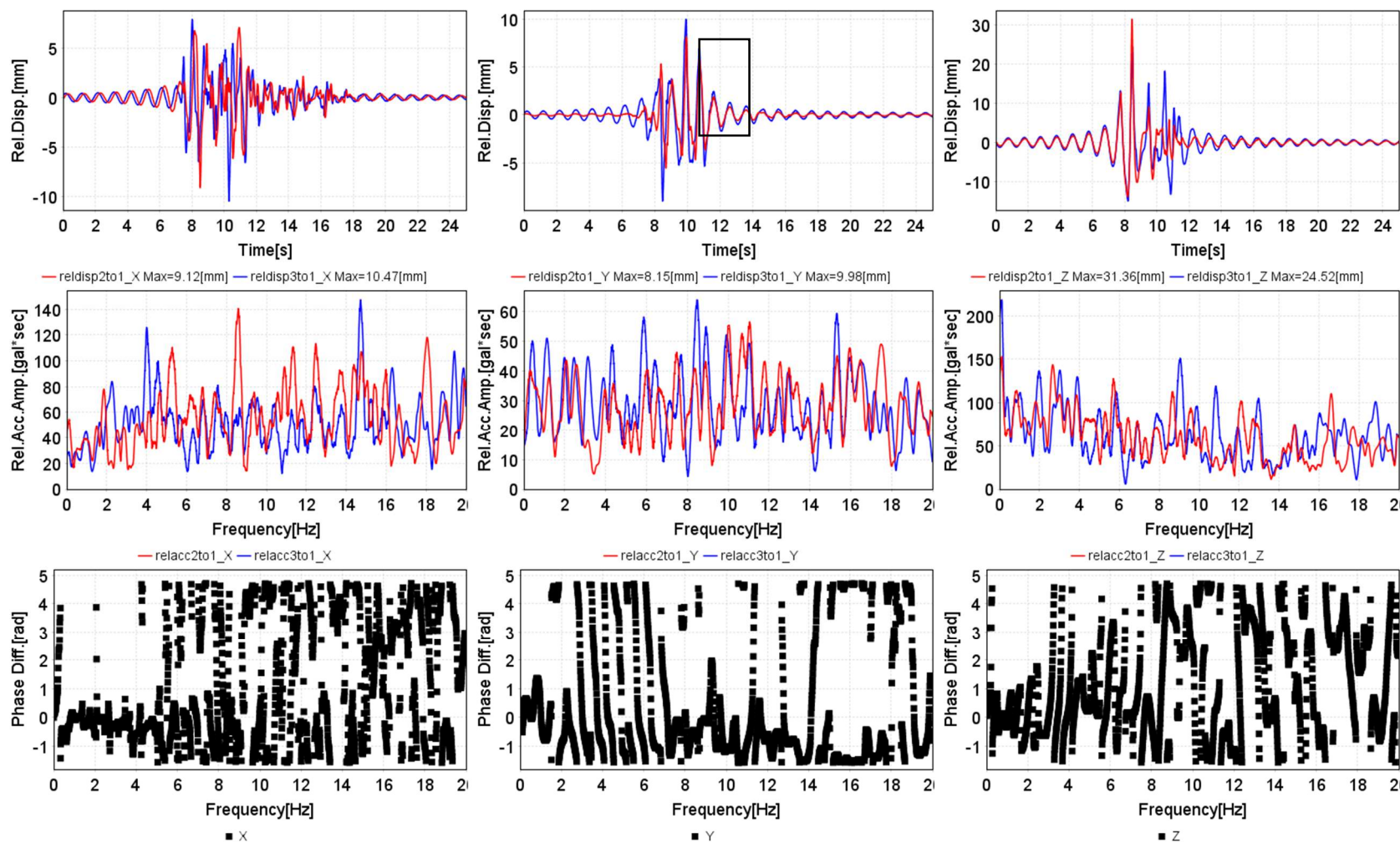


図 3. 2. 1-16 最大変位時の応答形状[単位：mm]



(a) T037

図 3.2. 1-17 相対変位時刻歴波形、相対加速度フーリエ振幅スペクトル及び位相差分



(b) T052

図 3.2.1-17 相対変位時刻歴波形、相対加速度フーリエ振幅スペクトル及び位相差分（続き）

3.2.2 データ駆動的な性能更新手法の検討【R4-R6】

プラントライフサイクルにおいて地震時の挙動を監視し、収集したデータに基づきデータ駆動的にモデルを更新し、安全解析の範囲を超えた事象も含めて安全上重要となりうる事象を抽出する手法を変分オートエンコーダー (VAE) を用いて検討した。

【R4-R5】

令和4年度は、まず検討の対象とする部位について検討を行い、3.2.1の振動試験の試験体と同様、炉内構造物の地震応答を対象とした検討を行うことで課題を抽出することとした。具体的には、データ駆動的なモデル更新を行う上で、モニタリング可能なデータを整理した。炉内構造物は高温のため炉内構造物を直接の対象とした地震の揺れ（振動）の観測は難しいことなどを確認し、整理した。そのうえで、炉内構造物に関連したモニタリング項目として次の候補を抽出した。

- ・各ブロック位置における温度分布
- ・炉心の出入り口部における差圧

令和5年度は、プラントライフサイクルにおいて地震時の挙動を監視し、収集したデータに基づきデータ駆動的にモデルを更新し、安全解析の範囲を超えた事象も含めて安全上重要となりうる事象を抽出する手法について、変分オートエンコーダー (VAE) を用いて試算した。具体的には、次の通りである。

変分オートエンコーダー (VAE) を用いた手法の検討と試算については、通常の VAE⁽¹⁾ と発展形であるマルチモーダル変分オートエンコーダー (Multimodal VAE [JMVAE-k1])⁽²⁾ の2種類を検討し比較を行う。図3.2.2-1と図3.2.2-2に、変分オートエンコーダー (VAE) とマルチモーダル変分オートエンコーダー (Multimodal VAE [JMVAE-k1]) のグラフィカルモデルを示す。

応答解析モデルのモデルパラメータ θ を、観測記録 \mathbf{X}_{obs} に基づいてベイズ更新する場合、 θ の事後分布の確率密度関数 $p(\theta|\mathbf{X}_{\text{obs}})$ は次式のようになる。

$$p(\theta|\mathbf{X}_{\text{obs}}) = c_1 p(\mathbf{X}_{\text{obs}}|\theta) p(\theta) \quad (3.2.2-1)$$

ここで、 c_1 は定数、 $p(\mathbf{X}_{\text{obs}}|\theta)$ は観測記録 \mathbf{X}_{obs} の尤度、 $p(\theta)$ は θ の事前分布である。
(3.2.2-1)式の右辺の $p(\mathbf{X}_{\text{obs}}|\theta)$ について VAE の潜在変数 $\mathbf{z} \in \mathcal{Z}$ で周辺化すると次式を得る。

$$p(\mathbf{X}_{\text{obs}}|\theta) = \int_{\mathcal{Z}} p(\mathbf{X}_{\text{obs}}|\mathbf{z}) p(\mathbf{z}|\theta) d\mathbf{z} \quad (3.2.2-2)$$

(3.2.2-2)式の右辺の $p(\mathbf{X}_{\text{obs}}|\mathbf{z})$ にベイズの定理を適用すると

$$p(\mathbf{X}_{\text{obs}}|\mathbf{z}) = \frac{p(\mathbf{z}|\mathbf{X}_{\text{obs}}) p(\mathbf{X}_{\text{obs}})}{p(\mathbf{z})} = c_2 \cdot \frac{p(\mathbf{z}|\mathbf{X}_{\text{obs}})}{p(\mathbf{z})} \quad (3.2.2-3)$$

ここで、 c_2 は定数である。(3.2.2-3)式を(3.2.2-2)式に代入すると、次式を得る。

$$p(\mathbf{X}_{\text{obs}}|\boldsymbol{\theta}) = c_2 \int_{\mathbf{z}} \frac{p(\mathbf{z}|\mathbf{X}_{\text{obs}})p(\mathbf{z}|\boldsymbol{\theta})}{p(\mathbf{z})} d\mathbf{z} \quad (3.2.2-3)$$

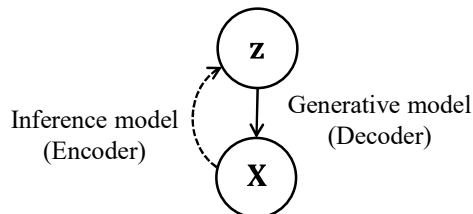


図 3.2.2-1 変分オートエンコーダー (VAE) のグラフィカルモデル

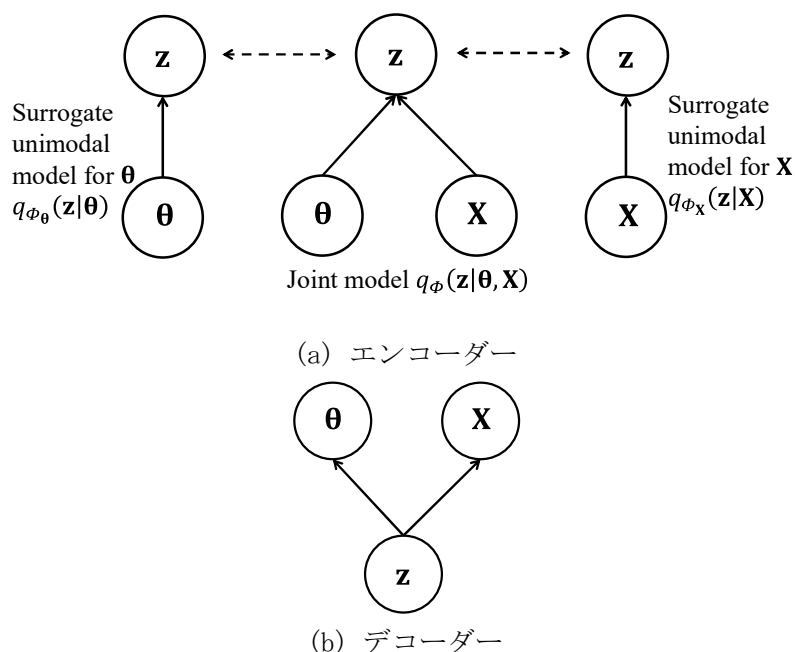


図 3.2.2-2 マルチモーダル変分オートエンコーダー (Multimodal VAE [JMVAE-k1]) のグラフィカルモデル

ここで、 $p(\mathbf{z})$ は平均 0、分散行列が単位行列となる多変量正規分布であり、 $p(\mathbf{z}|\mathbf{X}_{\text{obs}})$ は VAE のエンコーダーに \mathbf{X}_{obs} を入力した出力で正規分布に従う。 $p(\mathbf{z}|\boldsymbol{\theta})$ も正規分布であるが、その算出方法は VAE と Multimodal VAE で異なる。VAE では任意のモデルパラメータ $\boldsymbol{\theta}$ について応答解析を行うことで \mathbf{X} を求め、その \mathbf{X} を VAE に代入することで求める。つまり、数値積分の計算時に多数の応答解析を行う必要がある。一方、Multimodal VAE を用いる場合、 $p(\mathbf{z}|\boldsymbol{\theta})$ はユニモーダルなエンコーダーに任意の $\boldsymbol{\theta}$ を代入することで求まるため、数値積分の計算時に応答解析を行うことが不要となる。特に応答解析の負荷が大きいような大規模モデルのモデル更新の際には Multimodal VAE を用いることに利点がある。一方で、 $p(\mathbf{z}|\boldsymbol{\theta})$ をユニモーダルなエンコーダーを代替モデルとして用いる場合、その誤差がモデル更新に影響する場合があります、その精度検証を行う必要がある。

図 3. 2. 2-3 に精度比較の枠組みを示す。3 つのステップで行う。

- ステップ 1 : 応答解析モデルの正解値を設定し、そのモデル（正解モデル）において地震動を入力し、応答解析を行う。
- ステップ 2 : 様々なモデルパラメータを有する多数の応答解析モデルを作成し、地震応答解析を行うことで学習データを作成し、VAE の学習を行う。この際、入力地震動は、ステップ 1 のモデルの最下階で観測された記録（ステップ 1 の正解モデルに対する入力地震動に観測ノイズを加えたもの）を共通で用いる。
- ステップ 3 : 学習した VAE を用いて (3. 2. 2-3) 式の積分を計算し、尤度 $p(\mathbf{X}_{\text{obs}}|\boldsymbol{\theta})$ を求める。

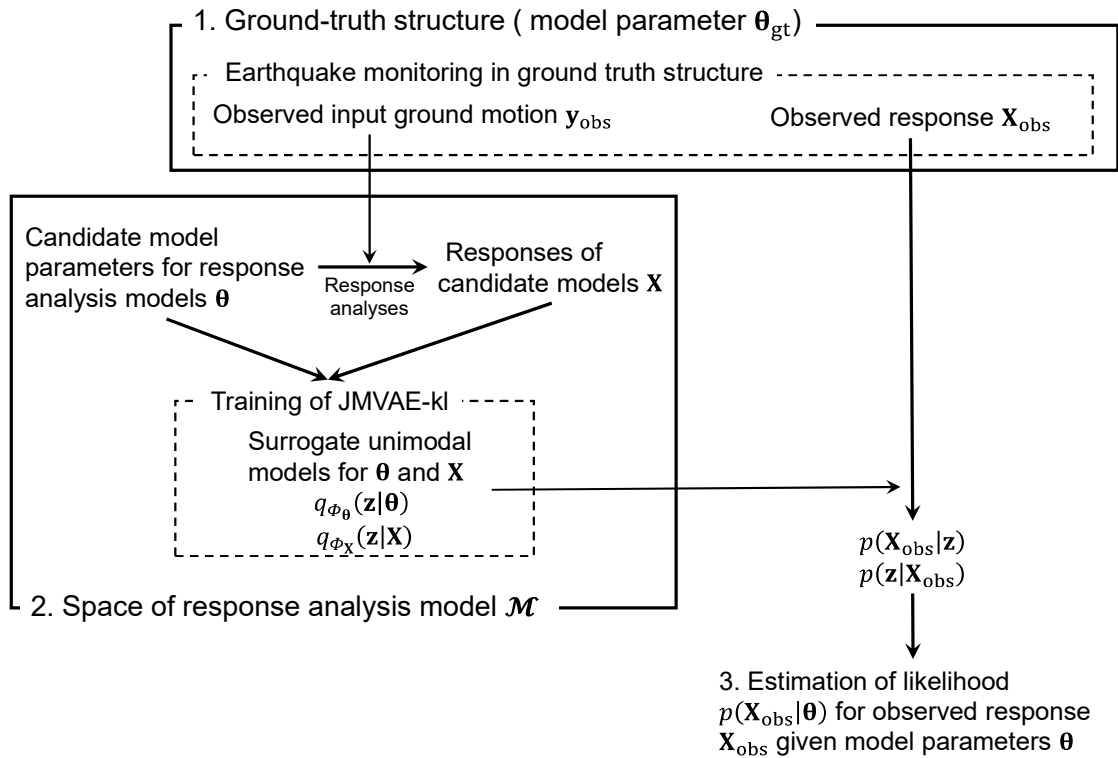


図 3. 2. 2-3 変分オートエンコーダー（VAE）を用いたモデル更新手法の検証手順

令和 5 年度は、原子炉建屋などの鉄筋コンクリート造の建屋を想定した 3 質点系の弾塑性応答解析モデル（図 3. 2. 2-4）を対象に、手法の有効性を検討した。質量は、下から順に、 7.5×10^4 kg、 7.3×10^4 kg 及び 5.5×10^4 kg とし、弾塑性特性を表す履歴特性には修正武田モデルを用いた。修正武田モデルのパラメータは、各層の初期剛性 k_i ($i = 1, 2, 3$)、ひび割れ変位 d_c 、降伏変位 d_y 、ひび割れ後剛性 $\alpha_c k_i$ ($i = 1, 2, 3$)、降伏後剛性 $\alpha_y k_i$ ($i = 1, 2, 3$)、除荷時剛性 k_d を決める指数 γ 、スリップ区間の剛性 k_s を決める指数 λ を未知の変数とし、 α_c 、 α_y 、 γ 、 λ は全層で共通とした。なお、 k_d と k_s は次式で定義される。

$$k_d = \frac{Q_{\max}}{d_y - d_c} \cdot \left| \frac{d_{\max}}{d_y} \right|^{-\gamma} \quad (3. 2. 2-4)$$

$$k_s = \frac{Q_y - Q_c}{d_{\max} - d_0} \cdot \left| \frac{d_{\max}}{d_y} \right|^{-\lambda} \quad (3.2.2-5)$$

ここで、 d_{\max} 、 Q_{\max} は最大応答変位と d_{\max} に対応する荷重である。設定した修正武田モデルのパラメータの正解値を表 3.2.2-1 に示す。図 3.2.2-5 と図 3.2.2-6 に入力地震動（2016 年熊本地震，KiK-net 益城³⁾）と正解モデルの応答解析結果（一部）を示す。

VAE と Multimodal VAE は、残差ブロック（Residual Block）を用いて構成した。例として VAE の構成を図 3.2.2-7 に示す。事前分布を一様分布と仮定した場合の事後分布の累積分布関数を図 3.2.2-8 に示す。事後分布はレプリカ交換モンテカルロ法を用いてサンプリングした。例としてベイズ更新を行った 9 個のパラメータのうち各層の弾性時の層剛性 k_i ($i = 1, 2, 3$) の更新結果を示す。VAE、Multimodal VAE を用いた場合のいずれも正解値を含む形で事後分布を求めることができている。正解値に対して事後分布に幅がみられるが、この幅が将来、異なる地震動を受ける際の応答、特に評価される応答の不確かさを評価するうえで重要となる。

ただし、Multimodal VAE を用いた場合では幅があり、これは前述した $p(\mathbf{z}|\boldsymbol{\theta})$ をユニモダルなエンコーダーを代替モデルとして近似する際の誤差の影響と考えられる。尤度の計算に必要な時間を比較した結果を表 3.2.2-2 に示す。Multimodal VAE を用いることで計算時間は大幅に短縮されることから、有限要素解析などのモデルパラメータの更新など計算負荷が高いことが想定されるものについては、Multimodal VAE を用いることに利点があると言える。

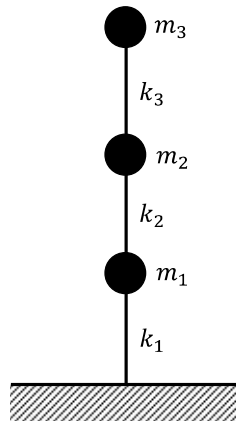


図 3.2.2-4 3 質点系モデル

表 3.2.2-1 モデルパラメータの正解値

k_1 [kN/mm]	k_2 [kN/mm]	k_3 [kN/mm]	d_c [mm]	d_y [mm]
140	110	60	8	40

α_c	α_y	γ	λ
0.1	0.02	0.4	0.5

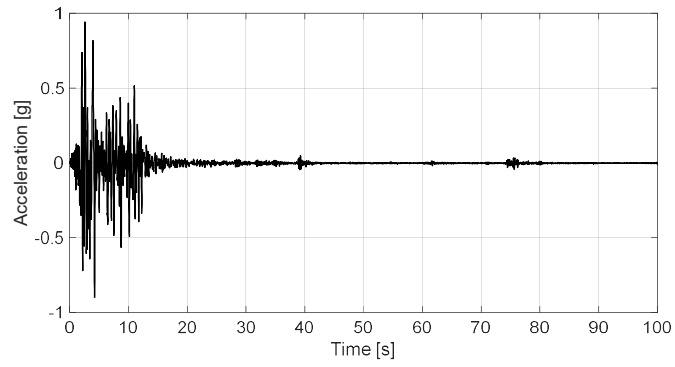
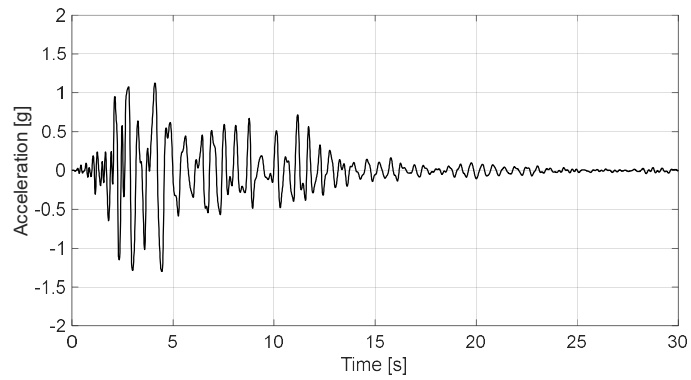
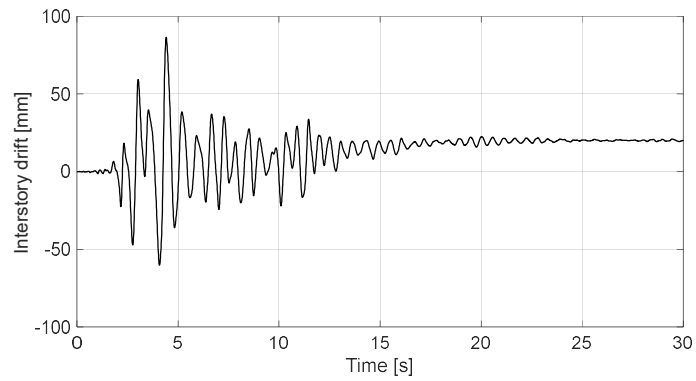


図 3.2.2-5 入力地震動³⁾



(a) 最上階加速度



(b) 最下階層間変形

図 3.2.2-6 正解モデルの応答波形（一部）

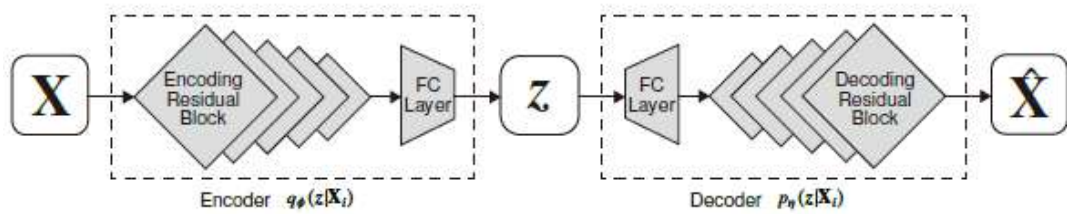


図 3.2.2-7 VAE の構成

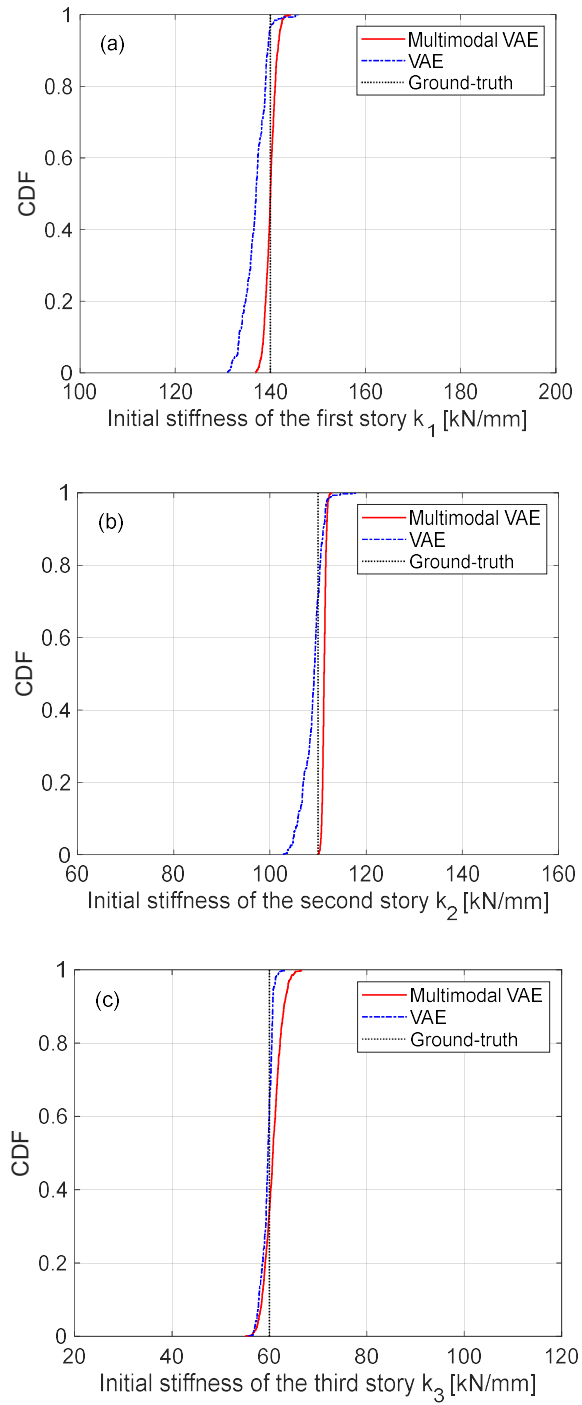


図 3.2.2-8 事後分布の累積分布関数と正解値の比較

表 3.2.2-2 尤度の計算に要する計算時間の比較
(OS: Windows, CPU: Intel i9-13900KF @ 3.00GHz, GPU: NVIDIA GeForce RTX 4090, RAM: 128GB)

VAE	Multimodal VAE
55327.5 [s]	137.9 [s]

ベイズ更新を行ったモデルパラメータを有する応答解析モデルを用いた予測問題として、2011 年東北地方太平洋沖地震の大船渡町（気象庁）における観測地震動（東西方向成分、図 3.2.2-9）を入力とした応答解析を行った結果の例を図 3.2.2-10 に示す。例として、VAE を用いた更新手法に対する検討結果を示す。図より、特に層間変形において、残留変形（最終時刻の変形の値）の値にモデルごとの違いが見られることがわかる。モデルごとに予測される損傷の状態も異なることから、損傷の確率論的な評価につながる手法であることが理解できる。また、以上の議論を踏まえると、実務で用いられることが多い決定論的なモデル更新では、提案手法とは異なり、観測データに情報が含まれていないパラメータも含めて決定論的にモデルが更新されることになる。その場合、同定されたモデルに含まれる潜在的な不確実さが無視され、それを用いた決定論的な将来予測においても、バイアスや予測結果の幅が適切に考慮されない危険性があることが指摘できる。

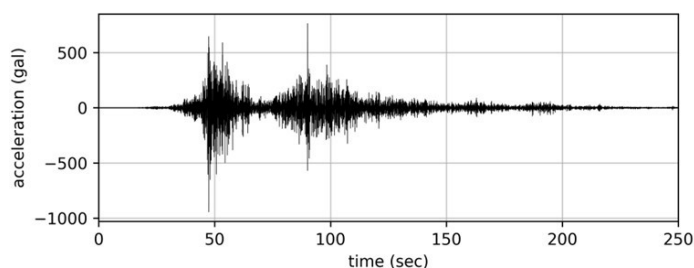
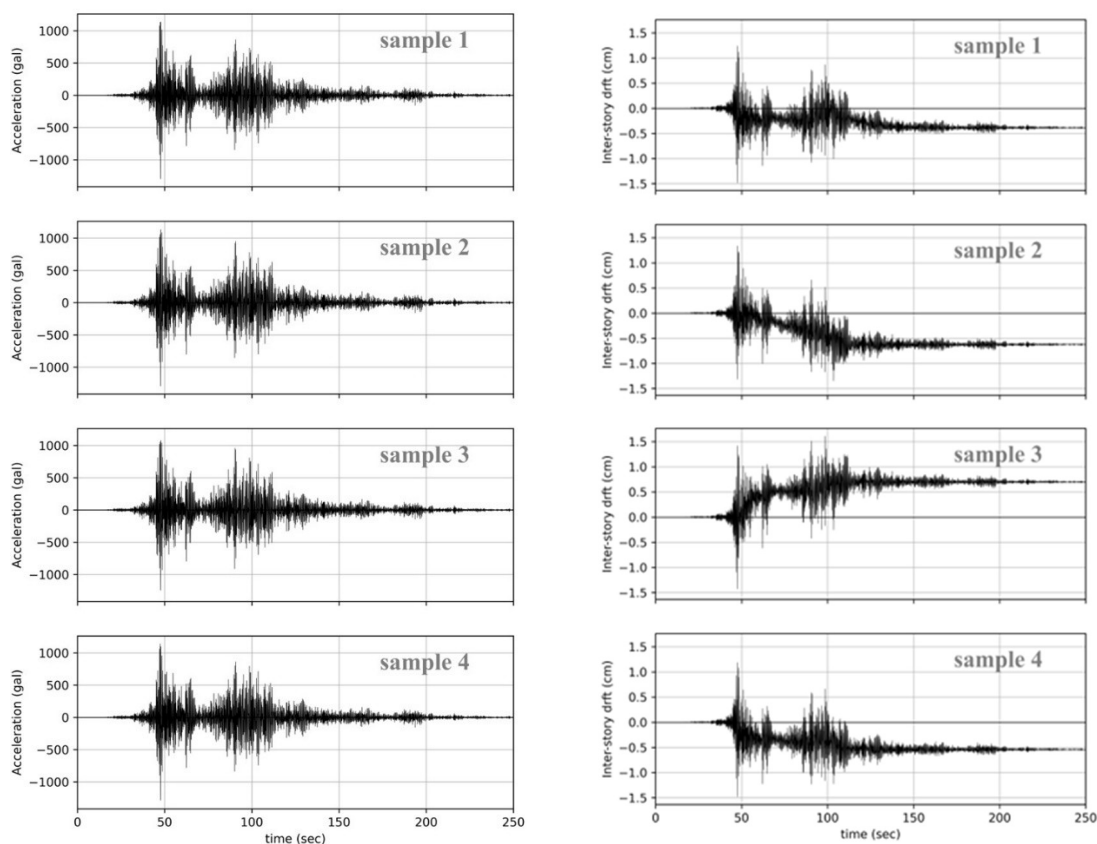


図 3.2.2-9 予測問題における入力地震動



(a) 最上階応答加速度

(b) 最下階層間変形角

図 3.2.2-10 予測問題に対するモデルごとの地震応答のばらつき

以上、プラントライフサイクルにおいて地震時の挙動を監視し、収集したデータに基づきデータ駆動的にモデルを更新し、安全解析の範囲を超えた事象も含めて安全上重要となりうる事象を抽出する手法について、令和5年度は建屋を想定し、変分オートエンコーダー（VAE）を用いて試算した。

【R6】

プラントにおいて地震時挙動を監視し、収集したデータに基づきデータ駆動的にモデルを更新し、設計想定範囲を超えた事象も含めて安全上重要となりうる事象を評価する手法を、変分オートエンコーダー（VAE）を用いて構築した。

具体的には、変分オートエンコーダ（VAE）の潜在空間を活用した確率論的モデル更新の手法を構築した。ここで、「確率論的」なモデル更新とは、複数回の観測記録がある前提として、応答解析モデルのパラメータ θ を確率分布の形でモデル化し、さらに評価した確率分布の不確実性を評価する手法であり、令和5年度の手法と比較して、パラメータ θ を確率分布の形でモデル化するより高度なモデルとなっている点異なる。

$$\theta \sim p(\theta|\phi) \quad (3.2.2-6)$$

ここで、 θ は確率分布 $p(\theta|\phi)$ を規定するハイパーパラメータである。 N_{obs} 回の観測記録 $\mathbf{X}_{\text{obs}} = [\mathbf{x}_{\text{obs}}^{(1)}, \mathbf{x}_{\text{obs}}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}_{\text{obs}}^{(N_{\text{obs}})}]$ が得られた際の、尤度 $p(\mathbf{X}_{\text{obs}}|\phi)$ を次式で計算する。

$$p(\mathbf{X}_{\text{obs}}|\phi) = \prod_{i=1}^{N_{\text{obs}}} p(\mathbf{x}_{\text{obs}}^{(i)}|\phi) \quad (3.2.2-7)$$

(3.2.2-7)式の右辺 $p(\mathbf{x}_{\text{obs}}^{(i)}|\phi)$ は、次式のように表すことができる。

$$p(\mathbf{x}_{\text{obs}}^{(i)}|\phi) = \int_{\mathbf{z}} \frac{q(\mathbf{z}|\theta_j^*)q(\mathbf{z}|\mathbf{x}_{\text{obs}}^{(i)})}{q(\mathbf{z})} d\mathbf{z} \quad (3.2.2-8)$$

ここで、 $p(\mathbf{x}_{\text{obs}}^{(i)}|\phi)$ は、 $q(\mathbf{z})$ はVAEのエンコーダーの出力で標準正規分布に従う。また、 $q(\mathbf{z}|\theta_j^*)$ 、 $q(\mathbf{z}|\mathbf{x}_{\text{obs}}^{(i)})$ は、それぞれ、モデルパラメータを用いた応答解析結果、観測記録を入力したVAEのエンコーダーの出力で正規分布に従う。

例題として2自由度系の振動モデル（図3.2.2-11）を考える。質量は確定値とし、下層から順に16.5ton、16.1tonとする。剛性は確率量とし下層から順に $k_1 = \bar{k}\theta_1$ 、 $k_2 = \bar{k}\theta_2$ （ $\bar{k} = 29.7\text{MN/m}^2$ ）とする。 θ_1 、 θ_2 は正規分布に従い、平均はそれぞれ0.49、0.92、標準偏差は0.1とする。1次モード、2次モードの減衰定数は確定値として0.05とする。VAE（図3.2.2-12）の入力は伝達関数（0～10.24 Hzまでの512次元データ）とし、理論

伝達関数（各質点の加速度／入力加速度）の計算に必要となる 6 つのパラメータ（1 次モードと 2 次モードの固有振動数、1 次モードと 2 次モードの各層における刺激関数）を観測量 $\mathbf{x}_{\text{obs}}^{(i)}$ とし、擬似乱数を用いて N_{obs} 回の観測記録を生成する。

VAE の学習データは解析モデルの空間上で行う。具体的には、 θ_1 、 θ_2 の平均値の取りうる値（ここでは 0.1～2）、標準偏差の取りうる値（ここでは 0～0.1）について擬似乱数を N_{obs} 回分生成し、それに対応する理論伝達関数を求めることを 100,000 回繰り返すことでテンソル型（100000, 1, 1, 512）の学習データとする。

例として、 $N_{\text{obs}} = 4$ と 8 の場合について推定した θ_1 、 θ_2 の平均値と標準偏差を理論値と比較したものを図 3.2.2-13 に示す。推定結果は理論値とよく一致しており、手法の妥当性が確認できた。

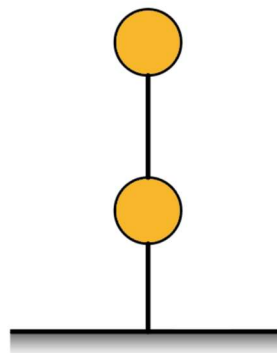


図 3.2.2-11 二自由度系モデル

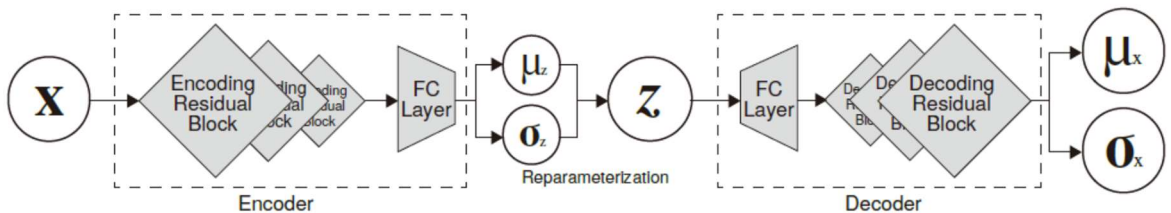
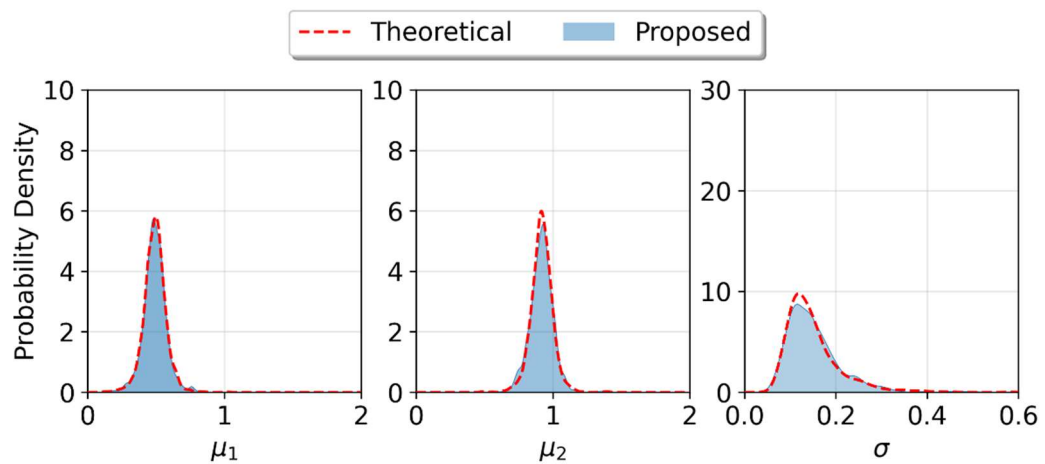
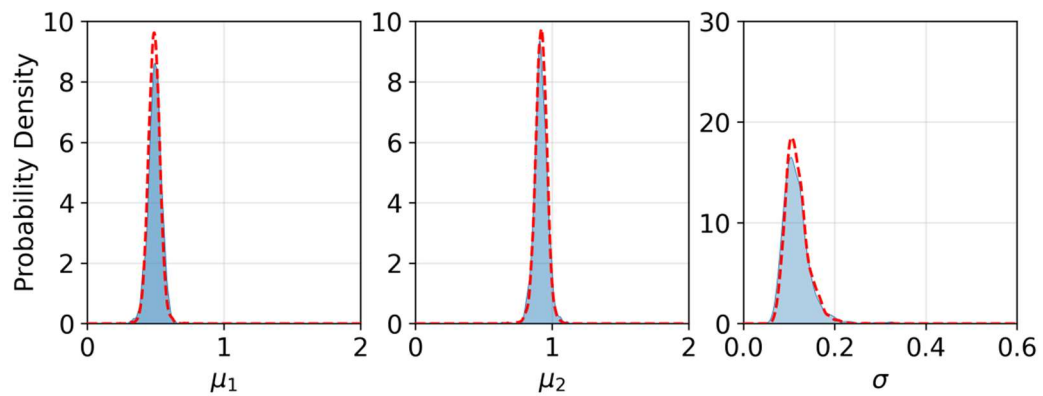


図 3.2.2-12 VAE の構成



(a) $N_{\text{obs}} = 4$



(b) $N_{\text{obs}} = 8$

図 3.2.2-13 ハイパーパラメータの推定結果

参考文献

- (1) Kingma, D. P. and Welling, M.: Auto-encoding variational bayes, Conference proceedings: papers accepted to the 2nd International Conference on Learning Representations (ICLR) 2014, 2014.
- (2) Suzuki, M., Nakayama, K., and Matsuo, Y.: Joint multimodal learning with deep generative models, arXiv preprint arXiv:1611.01891, 2016.
- (3) https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/html20160414212621/main_20160414212621.html (参照 2024-03-01)

3.2.3 革新的な実験データ取得手法・システムの構築 【R4-R6】

【R4-R5】

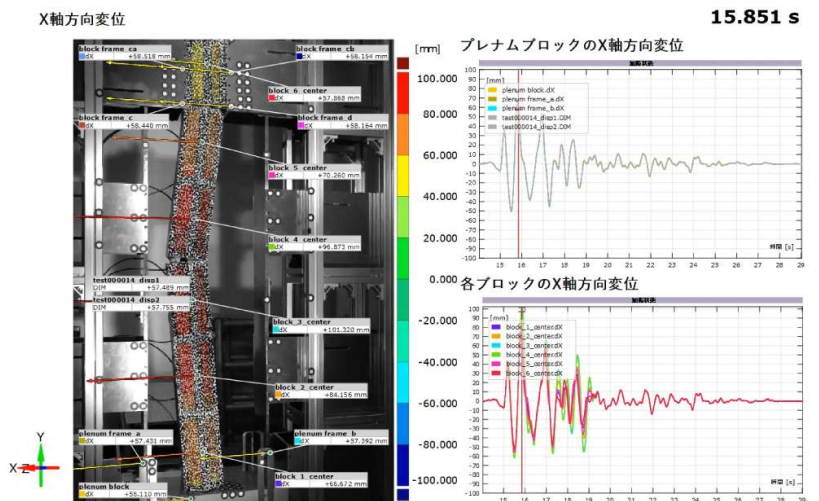
令和4年度は、上記手法の妥当性を検討する振動台実験を行うための振動台実験動画からのデータ取得について、オプティカルフローを用いた保有システムの改良手法を含めて既往検討の調査を行い、手法を選定した。また、最新の AI/IoT 技術の調査を実施し、特徴量抽出技術や主成分分析技術等について、振動の対象とする炉内構造物の振動台による振動計測結果から、炉内構造物の複雑な振動特性や衝突特性の評価に資する最適な実験データ取得方法を検討した。検討結果については、試験計画の策定（試験体の作製含む）に反映し、計測も含めた試験計画に関する検討を実施した。

振動台実験動画からのデータ取得については、既往検討の調査を行った結果として、高速度撮影によるデジタル画像相関法による変位・ひずみ測定及び MEMS センサを用いた無線加速度センサシステム（3.2.1 参照）による加速度測定を併用した詳細計測システムを選定し、3.2.1 の振動台試験の試実施に適用した。デジタル画像相関法では、試験体にランダムなパターンを塗布し、2 台のカメラでステレオ撮影を行うことで、3 次元変位分布を取得した。図 3.2.3-1 にプレナムブロック非固定の場合について、JMA 神戸 NS 波で加振したときの各ブロックの重心位置の水平方向位置の時刻歴を示す。図より加振方向の変位以外のブロックの3次元的な挙動を計測することに成功し、実験データ取得法の構築の目途を得た。

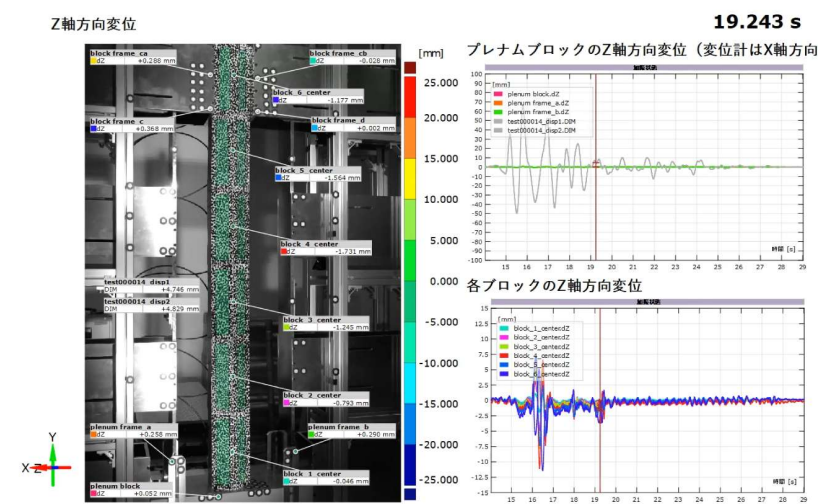
また、効率的な振動試験データの学習・抽出手法に関して、振動試験の実験効率化に資する機械学習等技術の活用についての研究を中心に調査を実施した。また、マテリアルインフォマティクス（機械学習等を活用して材料開発の効率化を図る分野・技術）をはじめとした他分野における実験効率化に資する機械学習等技術の活用についても調査することで、他分野で活用されている手法の本研究への応用可能性を検討した。

令和5年度は、令和4年度に調査した AI/IoT 技術について、調査を拡張するとともに、振動台を用いて取得した試験データをもとに、類似の試験体（将来的に改良が加えられた試験体等）や事象・シナリオにおいて、実試験無しに振動試験データの模擬を可能とするようなシステムに資する技術基盤を構築するために、試験結果への影響度の高いインプットパラメータの特定手法を検討した。

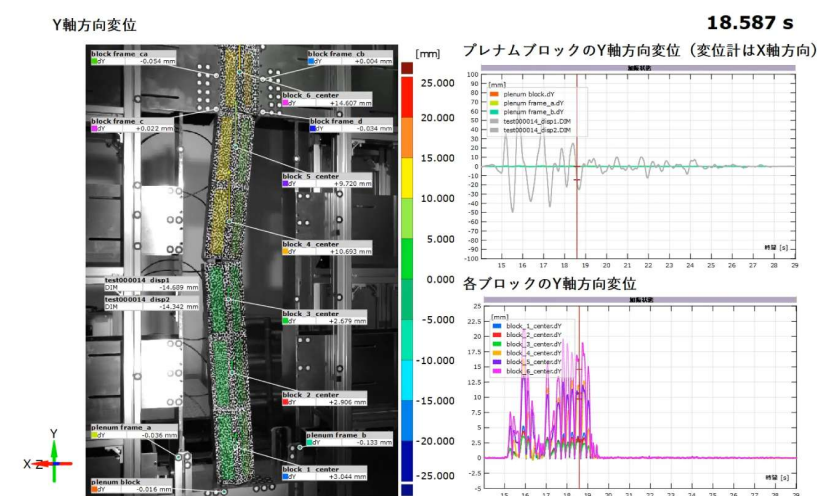
具体的には、令和4年度の調査結果を踏まえ、振動試験の結果に影響度の高いインプットパラメータを学習・抽出する手法について、取り得るインプットパラメータの不確実性等が大きい点を抽出し、次の測定点を提案する、ベイズ最適化による実験最適化の手法が適していると考察し、手法を検討した。



(a) 加振方向の水平変位



(b) 加振直交方向の水平変位



(c) 上下方向変位

図 3.2.3-1 デジタル画像相関法を用いた 3 次元計測結果の例
(プレナムブロック非固定の場合, 図中の変位は絶対変位)

【R6】

令和5年度に検討した手法について、振動台を用いて取得した試験データをもとに、類似の試験体（将来的に改良が加えられた試験体等）や事象・シナリオにおいて、実試験無しに振動試験データの模擬を可能とするようなシステムに資する技術基盤を構築するために、試験結果への影響度の高いインプットパラメータの特定手法を実施した。

具体的には、令和4年度に実施した振動台実験の1コラムモデルを模擬した応答解析モデル（3.1.1参照）について、表3.2.3-1に示す次の5つの応答解析結果が得られた状態で、最大振幅を最大化することを目的にベイズ最適化計算を実施した。獲得関数を Upper Confidence Bound (UCB) とし、 $UCB(x) = \mu(x) + 3\sigma(x)$ として、次の計算点を求めた。結果を以下に示す。

- 静止摩擦係数：0.31
- 動摩擦係数：0.012
- 指数減衰係数：10.3
- 体積粘性減衰：0.059

動摩擦係数の値に着目すると、約0.012が次の測定点として導出されており、ベイズ最適化を用いることで、効率的なパラメータの探索ができることを示した。

表 3.2.3-1 ベイズ最適化の入力とする5つの応答解析結果

静止摩擦係数	動摩擦係数	指数減衰係数	体積粘性減衰	最大振幅[cm]
0.41	0.025	100	0.06	5.06
0.3	0.025	100	0.06	5.47
0.41	0.025	10	0.06	5.30
0.41	0.025	100	0.05	5.46
0.41	0.01	100	0.06	5.92

3.3 高温ガス炉等新型炉の開発段階におけるリスク評価プロセスの開発

3.3.1 リスク評価プロセスの開発【R4-R6】

【R4-R5】

令和4年度は、3.1及び3.2の評価手法の研究推進と実適用に向けて、プラントライフサイクル全体における継続的なリスクプロファイルの更新と活用プロセスの構築について各分野の専門家、研究者・技術者などの意見を集め評価プロセスにおける論点を明確にして検討した。

具体的には、3.3.2に記載する高温工学試験研究炉における規制基準の調査と産業界等の専門家を含めた議論、軽水炉と高温ガス炉におけるリスク評価モデルとその実装状況の調査、国際会議における情報収集を踏まえ、内部構造が直接確認できないなかでの健全性評価の方法として、外部からモニタリング可能な情報から内部状態を推定する技術とその評価プロセス等を検討した。

優れた安全上の特性を有する高温ガス炉では、放射性物質を発電所敷地外へ大量に放出する可能性のある事故シーケンスは限定される。既往研究⁽¹⁾では、高温ガス炉における公衆被ばく上最も厳しい地震起因の事故シナリオとして、二重管両端破断とスタンドパイプ破損の多重起因故障に緩和機能喪失が重畳するシナリオが同定され、地震による確率論的公衆被ばくリスクの評価体系が整備された。また、より現実的なリスク評価へ向けた改善点として、黒鉛構造物の地震応答解析への非線形性の考慮等が挙げられている。これらの課題は、本事業の成果等も利用しつつ、実用高温ガス炉の運転開始前までに技術的に解決するものである。

一方、実用高温ガス炉の実現には、初期投資を回収して十分な収益を得られるだけの期間、プラントを継続的に利用できる見通しが得られることが必要である。たとえ、公衆被ばくリスクを有意に増加させる見込みは少ないとしても、運転を中断する必要があるような問題がプラント稼働後に惹起する恐れがあるならば、実用高温ガス炉を実用化するという意思決定には至らないと考えられる。そこで、公衆被ばくリスクに加えて運転継続リスクに対しても事前に評価することを念頭に、プラントライフマネジメントに関する国際会議(5th International Conference on Nuclear Power Plant Life Management)に参加し、情報収集を行った。着目点は、運転期間中に地震に対する規制要求が段階的に強化するような海外事例はあるかである。加えて、供用期間中に、事故には至らないものの設計基準を超える地震動を受けたときに、再稼働に向けて高温ガス炉でどのような確認作業が必要になるかの検討に着手した。

プラントライフサイクルを通じた地震リスク評価の方法として、フランスの事例⁽²⁾が参考になる。フランスでは、10年毎に規制機関がプラントの安全性に関する包括的な評価を行って、その結果を元に次の10年間の運転可否を判断するような規制制度(PSR:定期安全レビュー)が採用されている。現在、フランスには34基の900Mwe級加圧水型軽水炉(PWR)が稼働しており、2018-2028年の期間に相次いで設計想定年数である40年を迎える。PSRは、プラントの現状が現行規制基準を満足していることを確認するコンプライアンス・レビュー、劣化レビュー、ストレステストや確率論的安全評価の見直しを含む安全再評価に大別され、本研究のスコープは特に、三番目の項目と関係する(コンプライ

アンス・レビューでも、耐震性に影響を与える設備の現状確認が丁寧に実施される)。4 回目のPSRでは、安全解析レポートの1.5倍の地震動、再起周期が2万年の最大地震動、再起周期が10万年の洪水、FujitaスケールEF4～EF5の竜巻に対する評価が要求されている。また、主要な内部ハザード（火災、爆発、洪水）と外部ハザード（地震、火災ハザード、洪水）に対するレベル1 確率論的リスク評価が要求される。

基準地震動を超える地震後の安全評価や、基準地震動の引き上げ後の炉内構造物交換に関しては、国内の電力事業者において知見がある。中越沖地震における経験は日本原子力技術協会（JANTI）でガイド化されており^{(3), (4)}、女川原子力発電所の再稼働の審査においても参考にされている。

日本のPWRでは炉内構造物の取り換え工事の実績がある⁽⁵⁾。これには応力腐食割れ等に対する予防保全の側面もあるが、一部のプラントでは炉心の耐震性向上のために高い優先度で実施されている⁽⁶⁾。軽水炉とは異なり、減速材に黒鉛を利用する高温ガス炉では、冷却材を抜き取ったり、内部に十分なスペースを確保したりすることが難しい。炉内構造物を装荷した状態でロボットを使って補修を行う工法や、炉内構造物を一体的に取り出して交換する工法の採用は、ハードルが高い点に留意する必要がある。

予備的な検討を実施した結果、高温ガス炉の炉内構造物等の健全性を確認する上で、次の情報は容易に利用可能であると考えられた。

- ・ ファイバースコープを利用して、炉内構造物の外観を検査する
 - ・ 炉停止状態における炉心流量と温度分布を計測し、冷却材流路の閉塞等の有無を確認する
- 本研究の成果から、これらに加えて、次の手段を提供できる可能性がある。
- ・ 地震動の応答と、事前に準備したモデルの比較から、当該地震動により構築物が損傷したタイミングを検知する。
 - ・ または、本震と余震の地震応答を比較することで、本震による構築物の損傷有無を確認する。

令和5年度は、3.2、3.3の評価手法の研究推進と実適用に向けて、プラントライフサイクル全体における継続的なリスクプロファイルの更新と活用プロセスの構築について各分野の専門家、研究者・技術者などの意見を集め評価プロセスにおける論点を明確にして試開発した。

具体的には、JAEAの有識者に対して、ヒアリングを実施し、以下の意見を得た。

- JAEAをはじめとした事業者で高温ガス炉について実証炉設計を開始しており、炉心大型化は1つの論点である。実証炉ではHTTRに対して10倍弱程度の出力増強を目指している一方で、完成までの残り期間を考慮すると基本的な設計方針（ブロックや燃料）はHTTRから大きな変更にならないことが理想である。このような状況を加味して、これまでの地震応答の挙動が実証炉の成立性にどのように影響するか考える

<p>必要がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 応力評価において保守性の評価が精緻化できれば設計を効率化できる。（例）ダウエルピンに関する現状の評価手法としては、応力の厳しい箇所についてSONATINAモデルを用い、ブロックの水平荷重からせん断応力と曲げ応力を評価し、許容基準と比較している。 ● 品質保証の観点では、銘柄による材料の基本的なパラメータと、そのパラメータをどのように担保するかがポイントとなる。設計に関連するブロックの形状や寸法には公差があり、炉心設計に用いられるものを耐震評価含めてどのように担保するかが論点になる。穴やブロックの形状は様々なところとも密接に関係しているので、関連する基準を緩和できないとパラメータ自体も緩和できない。 ● 運転中のモニタリングについては、耐放射線カメラを用いて炉内構造物のASI(Automated Surface Inspection)を実施している。例えば閉塞を計測したい場合には、プレナムブロックの温度分布あるいは炉心圧損による計測に限定される。オンラインで測定できる機能があれば運転中のモニタリングにも貢献するが、実際、一本のチャンネルが破損・閉塞する程度では、温度変動も容易には出ないため検知が難しい。
--

【R6】

令和5年度に試開発したリスク評価プロセスを改良した。

具体的には、2024 年能登半島地震後、北陸電力が実施している原子炉建屋及び建屋内設備等、地震による影響がないことを確認するための耐震健全性評価などの大規模地震発生後の事業者対応について、動向を調査・整理し、令和5年度に試開発したリスク評価プロセスを改良した。

ATENA では、発生した変圧器の故障・不具合について検討を実施している。検討の結果では、志賀原子力発電所では耐震重要度Cクラス機器の設計に用いられるものを上回る加速度を考慮し、設計していたが、地震時の応答加速度がそれを越えたことにより、配管損傷に至ったものであり、設計の考え方に問題はなかったとしている。また、外部電源の全喪失は回避できた（5回線中3回線健全）ことから、外部電源系統の多重性が地震に対しても有効であることを改めて認識する結果となった。また、機器故障により補修のみならず部品調達にも長時間を有する可能性があり、整理された教訓からは、地震による損傷を想定した計画的な部品調達（予備品）も重要な実施事項であると言える。

今回の変圧器故障を踏まえたATENAのとりまとめ及び他発電所における対策の方針は次の通りである。

<p>得られた知見・教訓</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 変圧器は耐震Cクラスに要求される地震動：1.2Ci（約0.2G）を上回る静的水平加速度0.5Gを考慮して設計されている。変圧器の放熱器等の付属品の強震は、それらの構造から想定されていたものであるが、志賀では実際の応答加速度が設計で考慮していたものを越えたことにより、損傷に至ったものである。この損傷により変圧器の機能喪失はあったものの、外部電源の全喪失を回避できたことから、外部電源系統の多重性が地震に対しても有効であることを改めて認識した。
------------------	---

	<ul style="list-style-type: none"> ● 変圧器絶縁油の漏えい後、通電状態のまま油面低下が継続した場合、絶縁破壊により変圧器内部の損傷に至り、復旧に長時間を要する（それ以外の損傷については、短期間に復旧が可能）。 ● 志賀2号機主変圧器は、配管損傷による絶縁油の漏えいによって、内部の油面が低下し、絶縁破壊により内部損傷に至った。内部損傷が発生した場合、部品調達、補修に長期間を要する。外部電源の信頼性が低下した状態が長期化することは望ましくないことから、変圧器の内部損傷を防止する取組みが重要。
対策	<ul style="list-style-type: none"> ● 変圧器は、耐震Cクラスに要求される地震動を上回る静的水平加速度を考慮して設計されており十分な設計上の考慮がなされていること、また、電源系統は外部電源系統の多重性や非常用D/G等の多様性によりシステム全体での頑健性が確保されていることから、変圧器の耐震強化は必須とはしない。 ● しかしながら、外部電源の信頼性が低下した状態が長時間継続することは望ましくないことから、変圧器の絶縁油油面低下に伴うアーク発生による内部損傷を防止する観点から対策を行う。 ⇒ブッシング損傷の防止対策として、変圧器の破損モード等を検討し、その結果を踏まえた絶縁油漏えい時の変圧器停止手順を整備する。 ● 今回の事象で放圧板が動作したこと、また過去の地震時にも放圧板が動作したプラントが複数あったことを踏まえ、放圧板に対する対策を講じる。 ⇒放圧板の早期復旧対策（予備品確保、自動復帰式等）を講じる。
対象	<ul style="list-style-type: none"> ● 原子力発電所の外部電源は、複数の送電線により多重性を確保するとともに、それらの間に独立性（1つの変電所または開閉所に連系していないこと）を確保することにより、信頼性を持たせている。 ● このことを踏まえ、当該の変圧器の機能喪失により、多重性または/及び独立性が失われる変圧器を対象とする。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 泊：1号起動変圧器、2号起動変圧器 ➤ 東通：高起動変圧器 ➤ 柏崎刈羽：予備電源変圧器（1～7号共用） ➤ 美浜：予備変圧器 ➤ 高浜：予備変圧器（1～4号共用） ➤ 伊方：3号主変圧器、3号所内変圧器 ➤ 東海第二：予備変圧器
対策実施時期	<ul style="list-style-type: none"> ● 再稼働済プラント：準備ができ次第、速やかに実施 ● 再稼働前プラント（許認可取得済あるいは再稼働時期公表済）：1サイクル運転後の定検終了までに実施 ● 再稼働前プラント（上記以外）：再稼働までに実施

令和4年度に検討したように、高温ガス炉においては、安全上重要な機器・設備に加えて、耐震重要度上最重要ではない機器・設備、特に、運転継続上重要、かつ、運転継続に大きな影響を及ぼす可能性のある脆弱性を有する可能性がある機器・設備に対するリスクマネジメントが重要である。そのような機器・設備も含め、リスク評価を行うプロセスの素案を図3.3.1-1に示す。影響が大きい故障についてGAN等を用いてスクリーニングし、スクリーニングを行った機器に対して詳細な評価を実施し、脆弱性が特定された機器・設備について対策を行う流れになる。

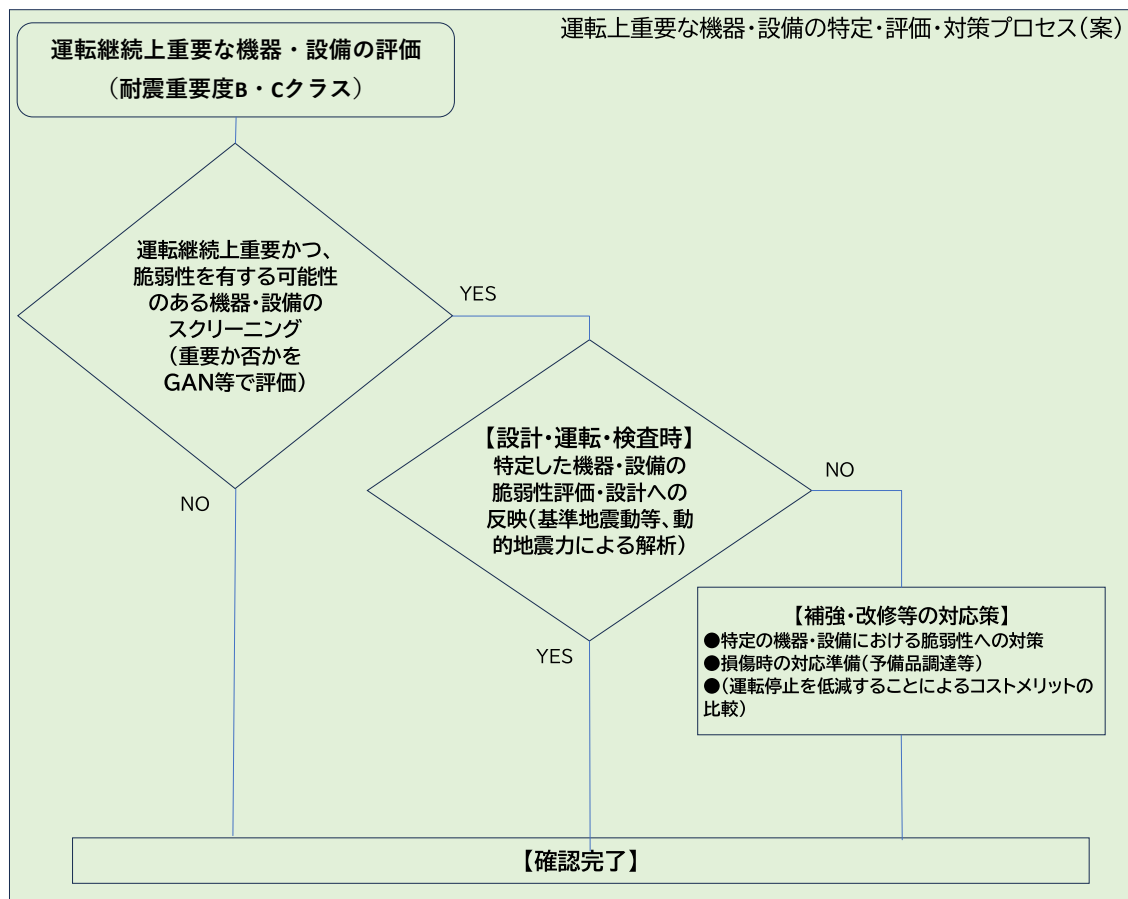


図 3.3.1-1 改良したリスク評価プロセスの素案

参考文献

- (1) 日本原子力研究所：英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 高温ガス炉の確率論的安全評価手法の開発 成果報告書，2018 年
https://www.kenkyu.jp/nuclear/field/h27/h29str_2_1report.pdf
- (2) S. Jayet-Gendrot, and S. Salvatores. “EDF experience on long term operation for the 900 MWe PWR fleet”, IAEA-CN-297-046 (2022)
- (3) 日本原子力技術協会：地震後の機器健全性評価ガイドライン 地震前計画と地震後の点検・評価，JANTI-SANE-G1，(2012)
<http://www.gengikyo.jp/archive/pdf/JANTI-SANE-G1.pdf>
- (4) 日本原子力技術協会：地震後の機器健全性評価ガイドライン 検査方法—配管・基礎

ボルト等, JANTI-SANE-G2, (2012)

<http://www.gengikyo.jp/archive/pdf/JANTI-SANE-G2.pdf>

- (5) Takahiro Tasuno, and Akinori Takei, “Overview of replacement of 3-loopPWR reactor vessel internal” , IAEA-CN-297-009, (2022)
- (6) T. Terachi, and M. Iwasaki, “Preparation for long-term operation of Kansai Electric Power” , IAEA-CN-297-007, (2022)

3.3.2 客観性向上に向けた産業界等の意見とりまとめ 【R4-R6】

【R4-R5】

令和 4、5 年度は、より広く成果が活用されることを目的に、産業界等の意見・ニーズを聴取し、当該年度分について取りまとめた。

産業界等の専門家との意見・ニーズ聴取に向けて、事前作業として高温工学試験研究炉（HTTR）における規制対応・関連研究等の情報を調査し、安全機能重要度分類や耐震重要度分類を整理した。産業界等の意見・ニーズの聴取として、5回の会合を開催した。これらの会合の議論を踏まえ、以下の示唆を取りまとめた。

1. 今後の高温ガス炉における耐震評価技術の開発においては、耐震設計時の健全性評価だけではなく、地震後の運転継続性等にも利用できる技術が、重要度が高い可能性がある。
2. 特に、地震動の検討とその影響評価だけでなく、地震後の構造物内部の健全性評価等に資するモニタリング技術や内部の推定手法等の検討が有用と考えられる。
3. 耐震評価を検討すべき対象物としては、本事業で振動試験の対象としている、黒鉛ブロック等の構造物の評価が重要である。

令和 5 年度は、プラントライフサイクル全体における継続的なリスクプロファイルの更新と活用プロセスの構築について各分野の専門家、研究者・技術者などの意見を収集するべく、会合を開催した。概要を次の通りとりまとめた。

日時：令和 5 年 12 月 27 日（水）13:00～15:00

外部専門家：JAEA 関係者及び外部コンサル

議事：黒鉛ブロックの応答解析モデルの開発に係る課題と方向性について

話題提供・質問した内容

- ・ 既往の解析モデルを用いた検討・評価ではダウエルピンの応力が厳しくなることがあるので、3次元モデルによる現実的な解析でダウエルピンの応力の状態が明らかになると良い。また、黒鉛ブロックはBクラスなので、基準地震動 S_s の地震動に対する検討については、規制上は求められない現状にある。ただし、黒鉛ブロックの交換は前提としていないので、運転を継続するためには黒鉛ブロックの損傷は避ける必要がある。
- ・ 実際の黒鉛ブロックはこの解析ほど浮き上がらない。今回、解析では水平変位を振動試験のそれと合わせるため動摩擦係数を小さくしているのでこれが影響している可能性がある。上部プレナムブロックとの相対変位を求め、解析上の各ブロックのドリフト変位を除去したい。
- ・ 現状、黒鉛ブロックを剛体でモデル化しているが、これを弾性体としてモデル化することが適切かどうかご意見を伺いたい。

- ・ 応答解析時間を短縮する方策があれば伺いたい。

外部専門家の意見

- ・ 解析モデルの材料定数は文献等により設定したということだが、材料の摩擦係数は建築学便覧に掲載されていることもものを用いることも多い。
- ・ 黒鉛ブロック全体として減衰を大きくするには、ブロック間が滑ることが有効である。このような観点からブロック間の摩擦係数やダウエルピンの効果を分析するのも面白い。
- ・ 解析に用いる反発係数は、基本的な実験（例えば 2 つのブロックでの実験）などによる実測結果を用いるとよい。材料定数だけ調整して応答を合わせるのは難しいのではないと思われる。ブロック単体の振動台試験データがあるのであれば、これを参考に解析パラメータを調整するのがよい。
- ・ 黒鉛ブロックを弾性体とした解析は、ダウエルピンが評価できる最小の単位である 2 ブロックでやってはどうか。モデルを複雑にしない方がよいと思う。
- ・ ダウエルピンの応力が耐震評価上課題であるのであれば、ダウエルピンの応力を詳細に評価するモデルを用いた検討を進める方がよい。
- ・ 解析の方法としては、まず全体を粗いモデルで、重要な部分を詳細モデルで解析する（ダウエルピンの非対称性の効果を検討するなど）のがよい。
- ・ 計算時間は刻み時間で決まるのでモデルのメッシュを粗くしても計算時間短縮の効果は低い。

当日の議論をまとめると次のとおりとなる。

- ・ 解析モデルの構築が、ダウエルピンの設計（形状の最適化など）に資するものとなるとよい。
- ・ 解析モデルは、なるべくシンプルな形とした方がよい。
- ・ 現状の実務で用いられている 2 次元モデルから、本研究で志向している 3 次元モデルとした場合に、これまで検討されていなかったブロックの挙動に関する知見が得られるかに注目するとよい。
- ・ 本プロジェクトの最終目標と解析モデルの関係を整理した上で、実振動試験無しに振動試験データの模擬が可能かについて詳細に検討するとよい。

【R6】

より広く成果が活用されることを目的に、産業界等の追加意見を聴取し取りまとめに反映した。

具体的には、令和 6 年度までの成果を紹介し、活用の可能性を議論する会合を開催した。概要を次の通りとりまとめた。

日時：令和 6 年 12 月 17 日(火) 10:00-11:50

外部専門家：JAEA 関係者

議事：本研究成果の今後の展開について

3年間の研究成果を紹介した。当日の議論では、次のような意見が出た。

- ・ 今回の解析は基礎的なモデルの検討でとどまっているが、今後、炉内構造物を反映したモデル化（黒鉛ブロック数、3次元的な構成）への拡張を期待する。
- ・ 観測記録を用いたモデル更新手法は、炉内構造物だけを適用先と考えるのではなく、建屋なども重要な適用先である。

3.4 研究推進【R4-R6】

【R4-R5】

研究代表者の下で各研究項目間の連携を密にして研究を進めた。

令和4年度は、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。また、国際会議論文1編（14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLICATION OF STATISTICS AND PROBABILITY IN CIVIL ENGINEERING, 発表は2024年7月）、国内会議論文1編（日本建築学会大会, 発表は2024年9月）の投稿を行った。

令和5年度は、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を計4回開催した。また、学術論文1編（Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 誌）が採択され、国際会議論文1編（27th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology（SMiRT 27））、国内会議論文1編（日本建築学会大会, 発表は2025年9月）の投稿を行った。

【R6】

令和6年度は、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を計4回開催した。また、学術論文2編（Structural Safety 誌, Mechanical Systems and Signal Processing 誌）を投稿し査読中である。国際会議論文2編（18th World Conference on Earthquake Engineering（WCEE2024）, 28th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology（SMiRT 28）, 発表は2026年8月）、国内会議論文1編（日本建築学会大会, 発表は2026年9月）の投稿を行った。

4. 結言

本事業では、「高温ガス炉等新型炉の信頼性向上に資する AI を用いた耐震評価技術の研究開発」として、次の内容を実施した。

(1) AI を用いた革新的な詳細耐震解析技術の開発

①地震動データの収集

地震動観測記録及び地震動予測に用いるパラメータに関する情報を収集した。

②GAN を用いた確率論的地震動生成システムの開発

新型炉の立地地点における地震動波形を生成する確率論的地震動ハザード評価手法を確立した。確立した手法を用いて確率論的地震動生成システムを構築し、妥当性を検証した。また、開発した手法を拡張し、時刻歴応答解析を基本とした確率論的地震リスク評価を実現するために、応答解析の代替モデルとシームレスに統合する方法を検討した。

(2) プラントライフサイクルにおけるデータ収集・更新システムの構築

①振動試験の実施

実構造物と同じ地震動による応力状態等を模擬可能な相似則を踏まえた振動試験計画の策定及び試験体の検討を行い、振動台試験を実施した。また、振動試験のデータ取得と革新的な実験データ取得方法の検討を行うとともに、実施した振動試験結果について再現性を解析するための分析を行った。

②データ駆動的な性能更新手法の検討

プラントにおいて地震時挙動を監視し、収集したデータに基づきデータ駆動的にモデルを更新し、設計想定範囲を超えた事象も含めて安全上重要となりうる事象を評価する手法を、変分オートエンコーダー（VAE）を用いて構築した。

③革新的な実験データ取得方法・システムの構築

振動台を用いて取得した試験データをもとに、類似の試験体（将来的に改良が加えられた試験体等）や事象・シナリオにおいて、実試験無しに振動試験データの模擬を可能とするようなシステムに資する技術基盤を構築するために、試験結果への影響度の高いインプットパラメータの特定手法を実施した。

(3) 高温ガス炉等新型炉の開発段階におけるリスク評価プロセスの開発

①リスク評価プロセスの開発

構築した評価手法の実適用に向けて、プラントライフサイクル全体における継続的なリスクプロファイルの更新と活用プロセスの構築について各分野の専門家、研究者・技術者などの意見を収集し評価プロセスにおける論点を明確にして検討した。

②客観性向上に向けた産業界等の意見取りまとめ

産業界等の専門家との意見・ニーズ聴取に向けて、事前作業として高温工学試験研究炉（HTTR）における規制対応・関連研究等の情報を調査した上で、産業界等の意見・ニーズの聴取として会合を開催した。これらの会合の議論を踏まえ示唆を取りまとめた。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間の連携を密にして研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

また、学術論文 1 編採択され、2 編が査読中である。加えて、国際会議論文 4 編、国内会議論文 3 編の投稿・発表を行った。

今後の展望としては、次が挙げられる。

- ・「AI を用いた革新的な詳細耐震解析技術」については、より性能規定型（Performance-based）に発展させることができる可能性がある。例えば、統計的安全評価などと組み合わせることによる従来の決定論的な耐震設計手法の革新や、様々な条件に対して性能を確保する設計法（ロバスト設計法）への展開などが考えられる。
- ・「プラントライフサイクルにおけるデータ収集・更新システム」については、より具体的な問題への適用を行い、手法としての有効性を高めることが求められる。また、本手法自体は、汎用的な手法であることから、耐震安全性の検討以外の様々な問題に適用が可能であると考えられる。他の原子力安全に関わる問題への適用性も今後の課題として検討したい。