

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

糸井達哉（東京大学）

研究体制

- 東京大学 大学院工学系研究科

- 糸井達哉（建築学専攻）
- 村上健太（レジリエンス工学研究センター）
- 八百山太郎（建築学専攻、現レジリエンス工学研究センター）
- 李 尚元（建築学専攻）
- 正木 信男（建築学専攻）
- 松本 雄馬（建築学専攻博士課程、現防災科学技術研究所）

- 新潟工科大学 工学部

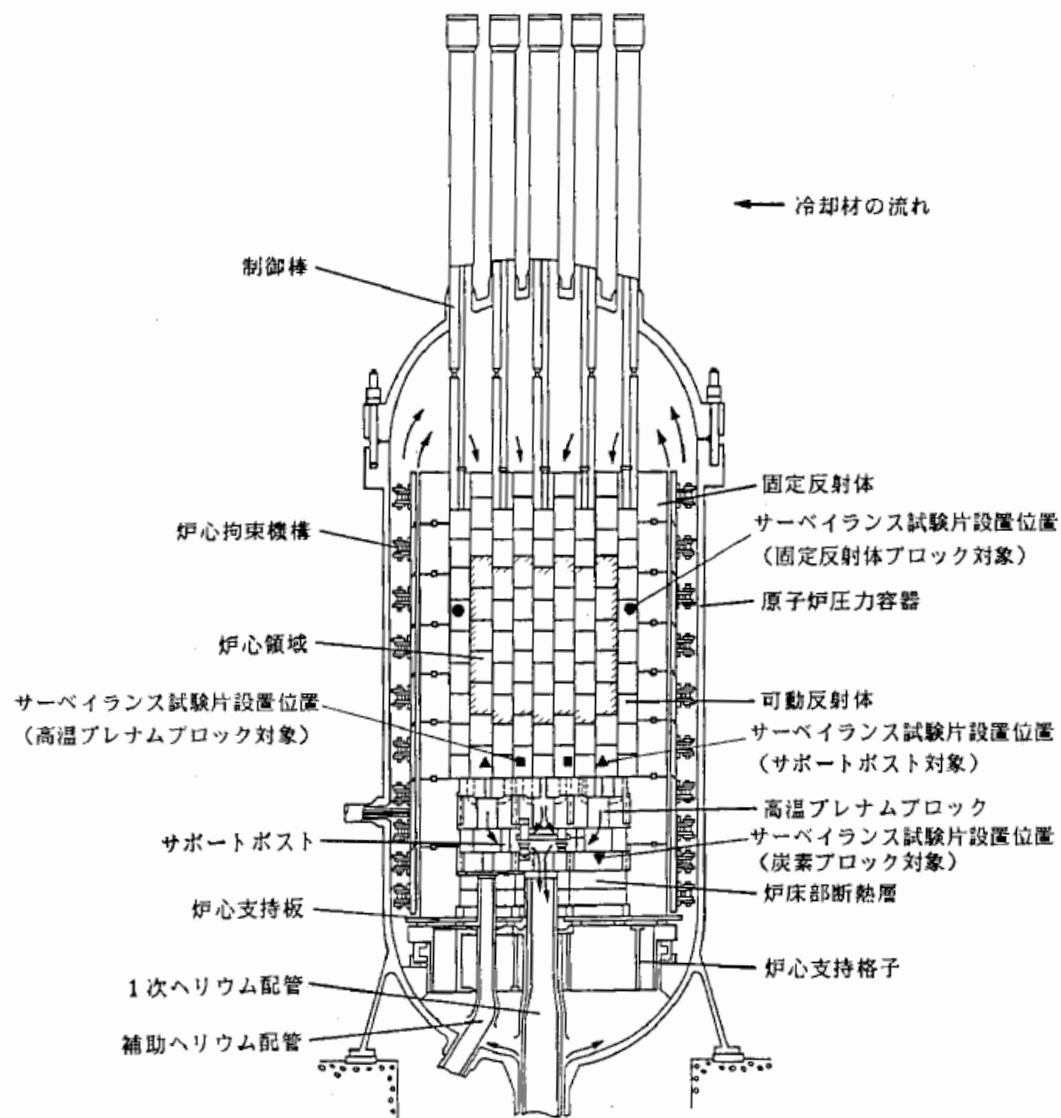
- 涌井 将貴（工学科建築都市学系）

他

研究の動機

- 高温ガス炉を含めた次世代原子力システムでは、原子力安全に加え、運転継続性の観点も重要
 - 直近では、2024年能登半島地震における志賀原子力発電所の被災事例で同様の議論
 - 耐震設計・評価では、稀な大地震に対する安全確保を前提に、比較的頻度の高い中小地震に対する運転継続性が必要
 - プラント運転時では、各種モニタリングデータを活用した、データ駆動的なモデル更新、および、プラントライフサイクルにおける現状（as-is）のプラントリスクの把握も重要な課題
- 👉 機械学習技術を活用して、このような評価をデータ駆動的に実施したい

炉内構造物（黒鉛ブロック）の地震応答解析モデルの構築



JAERI-M 90-020より抜粋

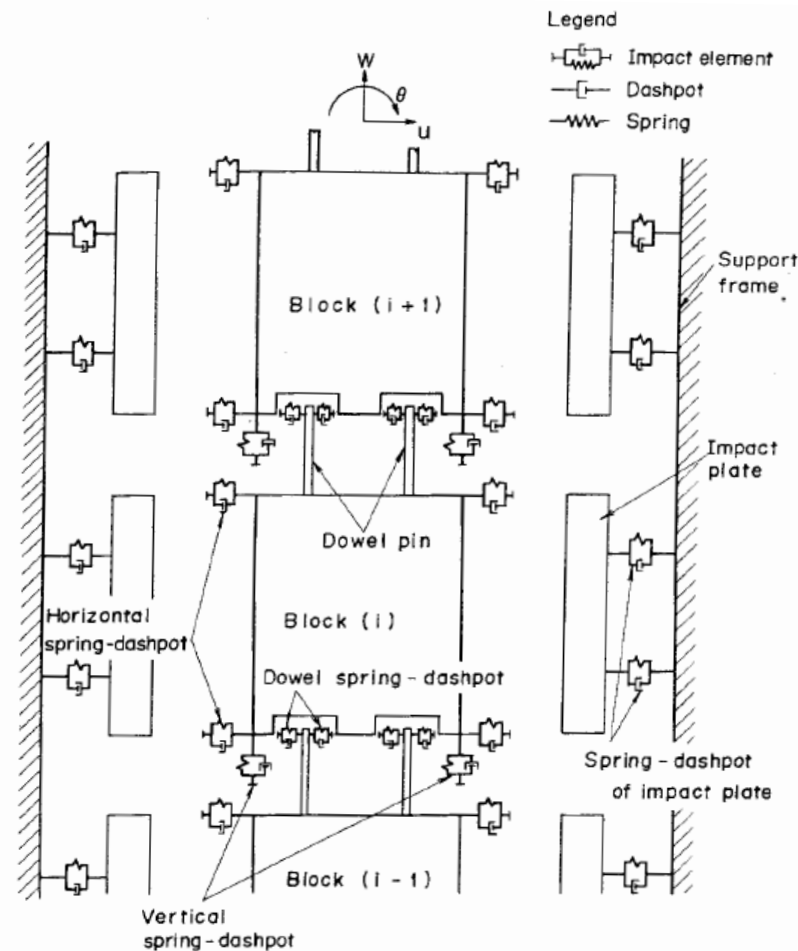
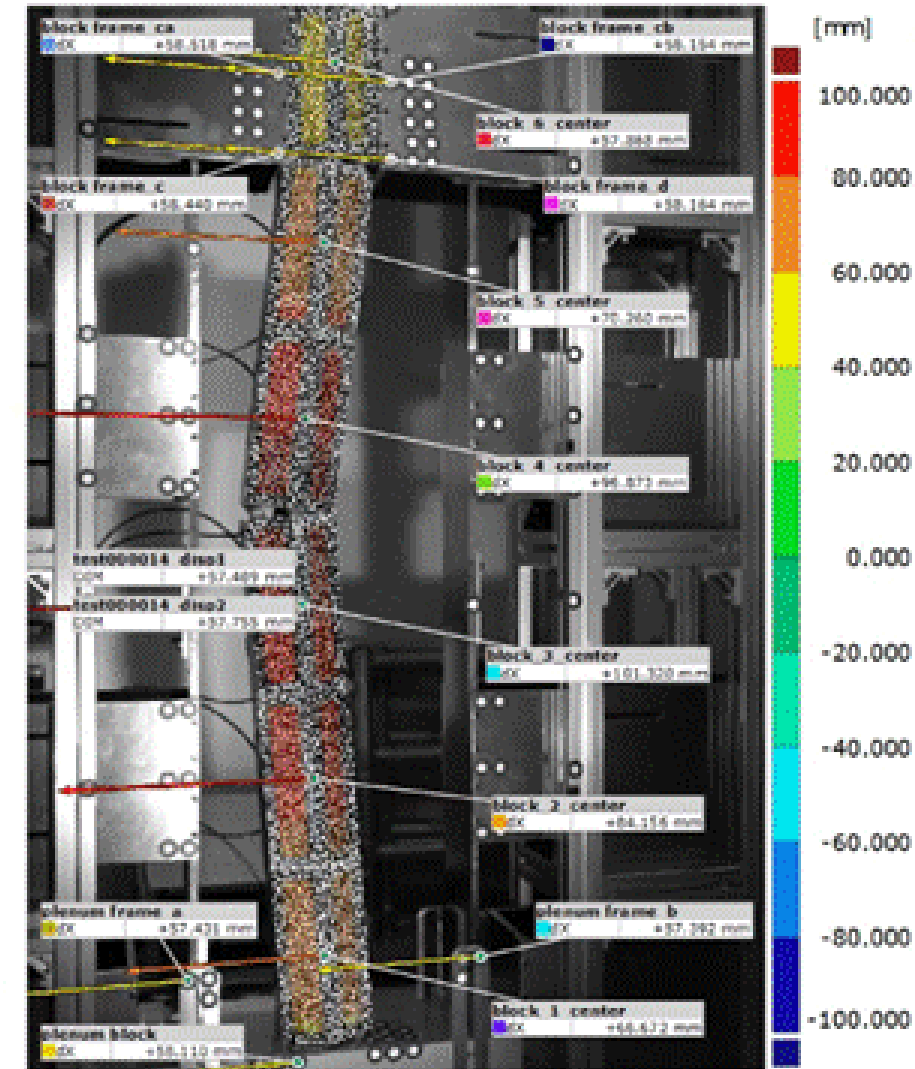
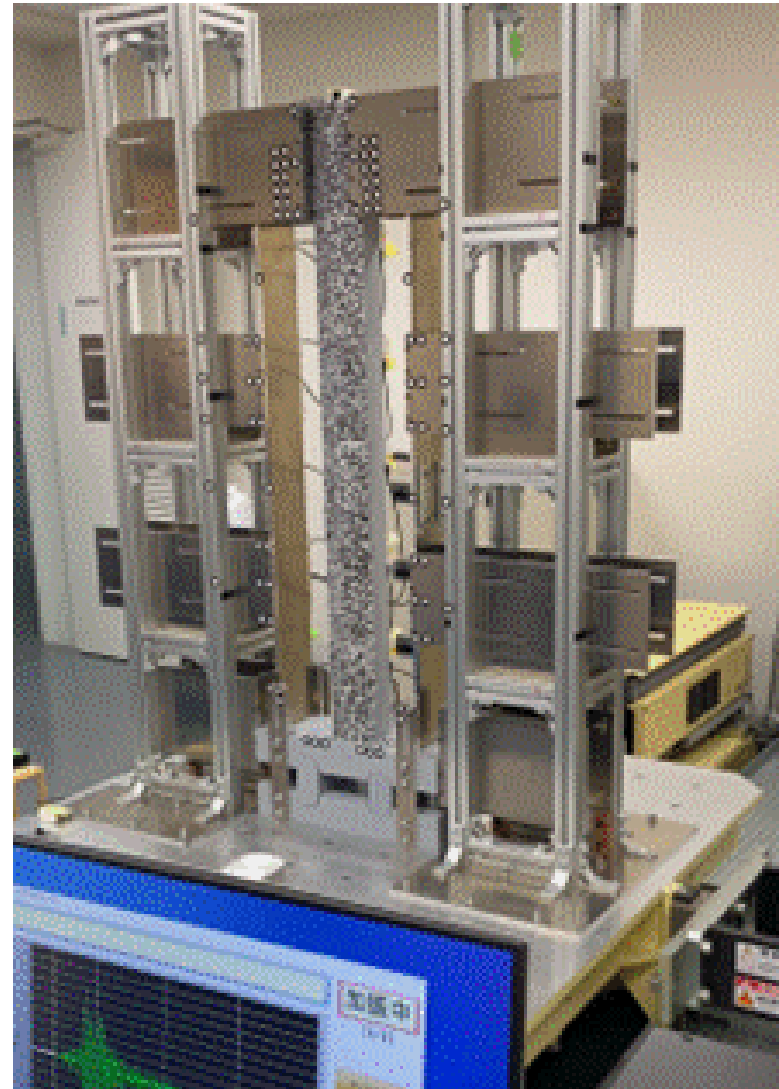
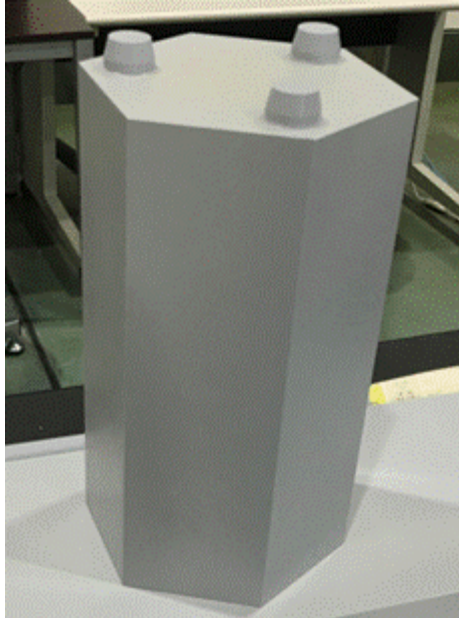


Fig. 7.2 Idealized spring-dashpot model

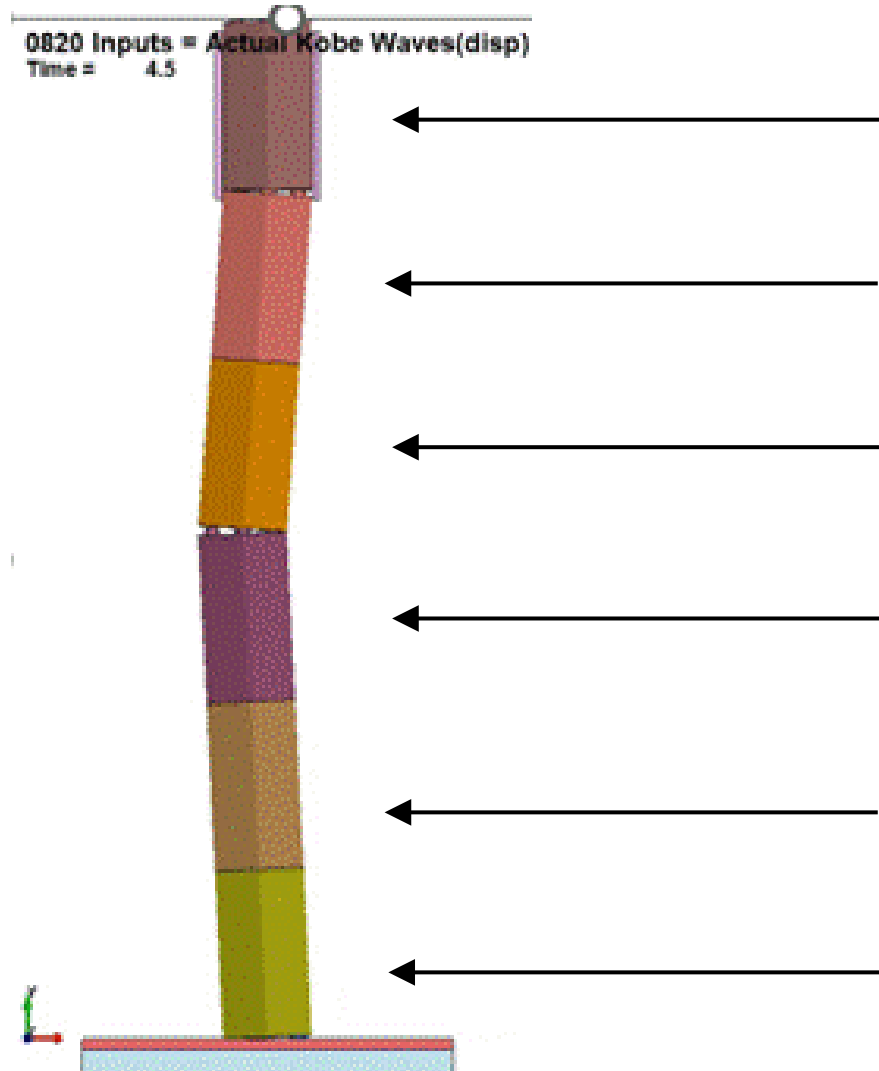
JAERI-M 9265より抜粋

炉内構造物（黒鉛ブロック）の地震応答解析モデルの構築 ～縮小模型による炉内構造物の振動台試験

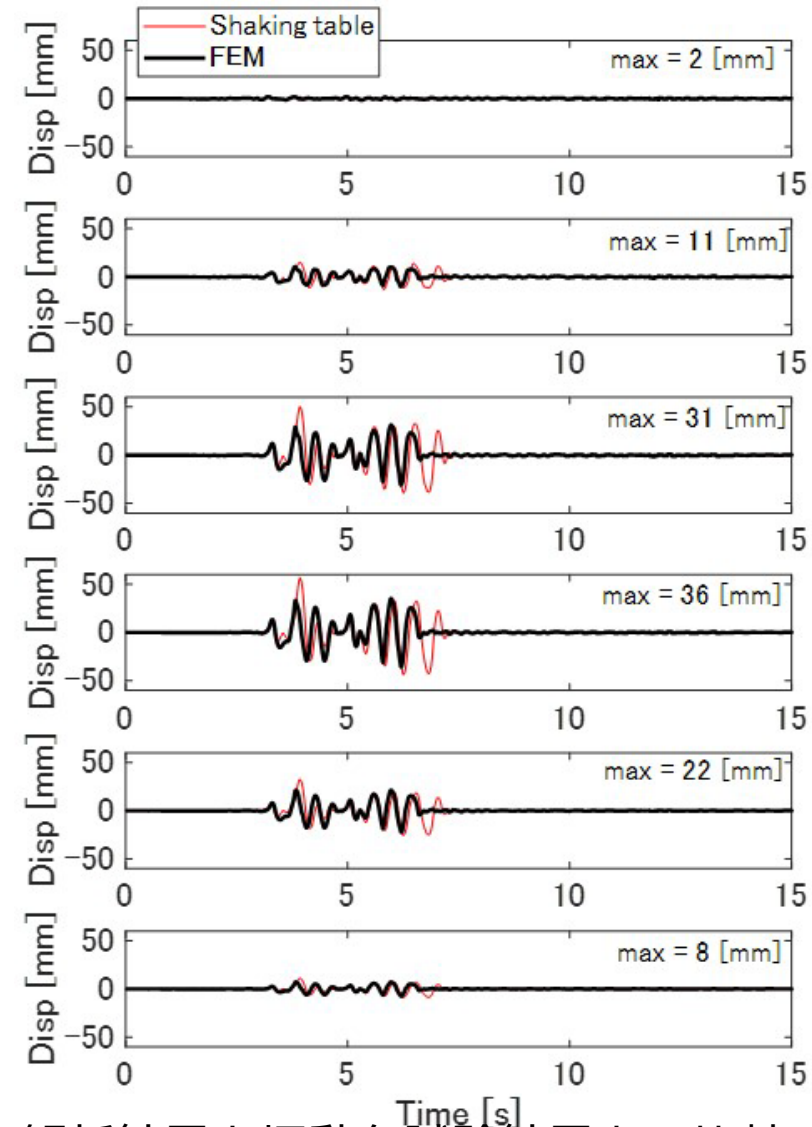
- 炉内構造物（塩化ビニル製）の振動台試験



炉内構造物（黒鉛ブロック）の地震応答解析モデルの構築 ～炉内構造物の有限要素解析モデルの構築



地震動入力時の応答のスナップショット



解析結果と振動台試験結果との比較

生成モデルを用いた地震動予測手法の開発

- 地震動観測記録および地震動予測に用いられるパラメータに関する情報を収集し、敵対的生成ネットワーク（GAN）を用いた学習を行うことで、地震動加速度時刻歴波形を生成するモデル（地震動生成モデル）を構築
 - 本研究ではStyleGAN2（Karras et al., 2020）を利用
 - プロトタイプとして内陸地殻内地震を対象として確率論的な地震動生成モデルを構築
 - これを用いて、評価地点における地震動波形をモンテカルロ的に生成する確率論的地震動ハザード評価手法を確立

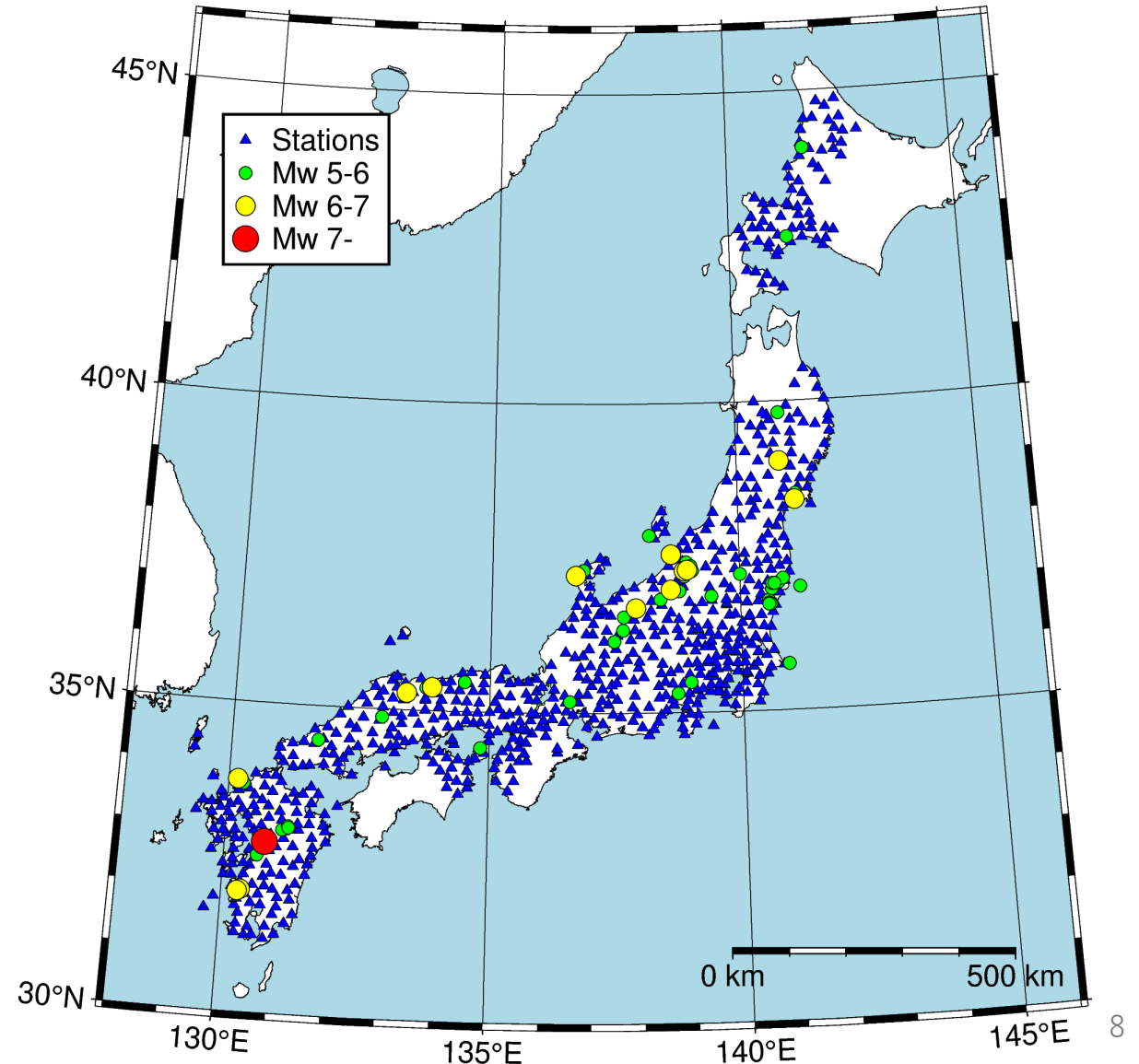


StyleGAN2 — generated images

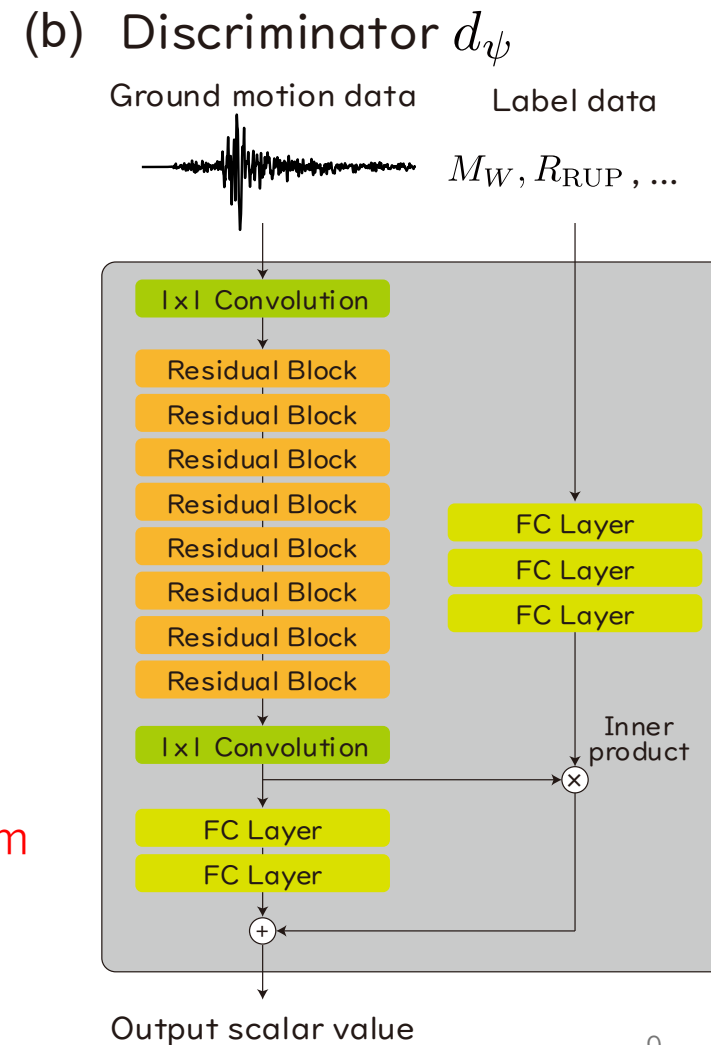
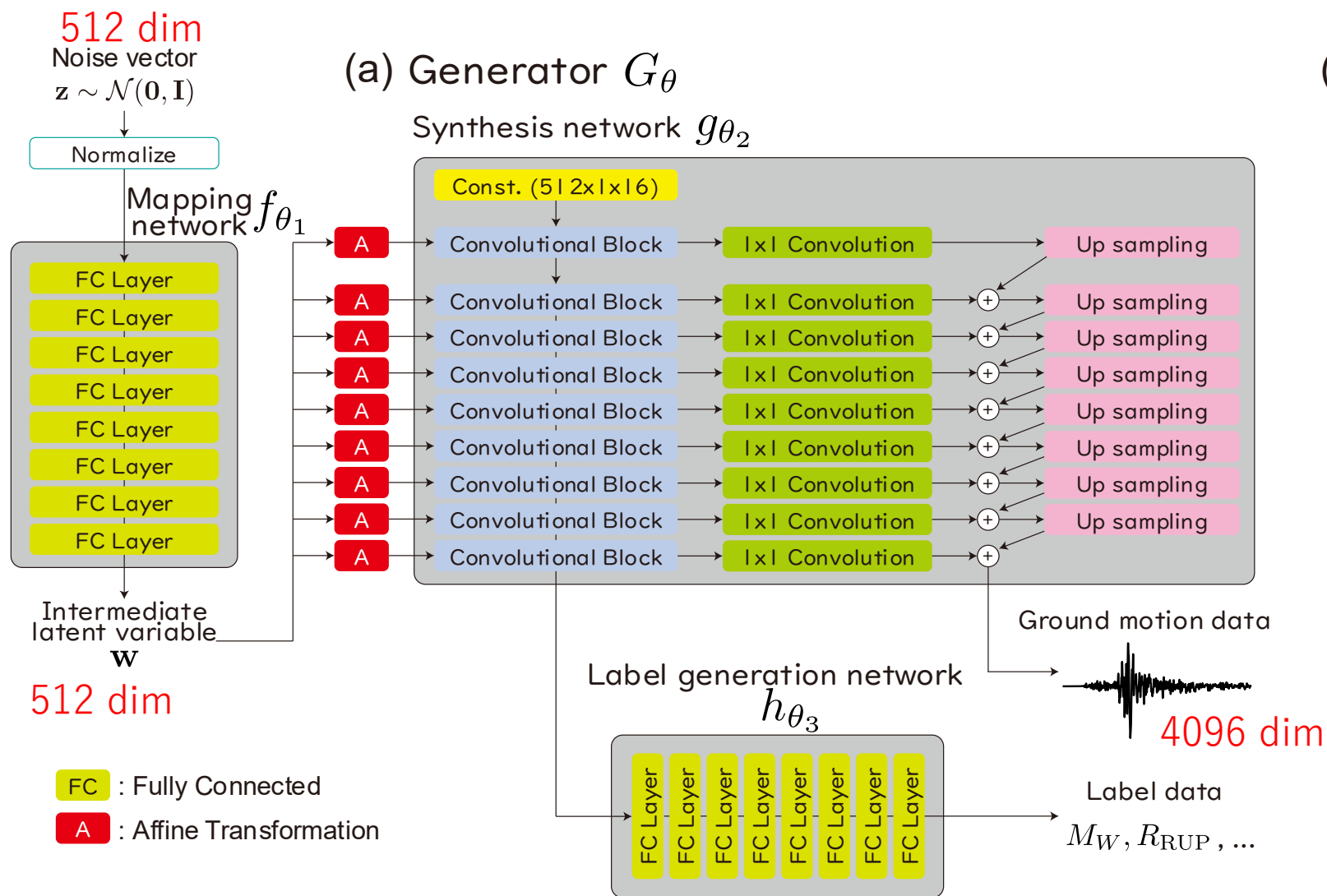
Karras et al., 2020より抜粋

生成モデルを用いた地震動予測手法の開発 ～学習データ

- 地殻内地震の記録を深層生成モデルで学習
 - 1997年～2016年の防災科研 K-NETでの観測記録
 - モーメントマグニチュード $M_w > 5$
 - 震源深さ $< 30\text{km}$
 - 断層からの距離 $\leq 100\text{ km}$
- 地震数: 62
- 記録数: 2712



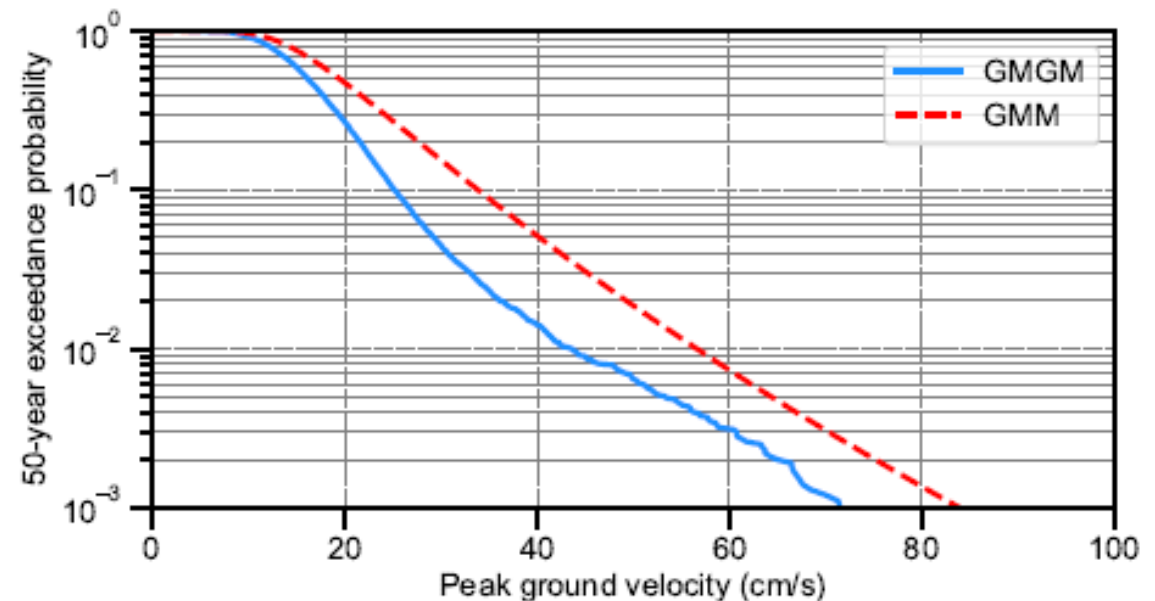
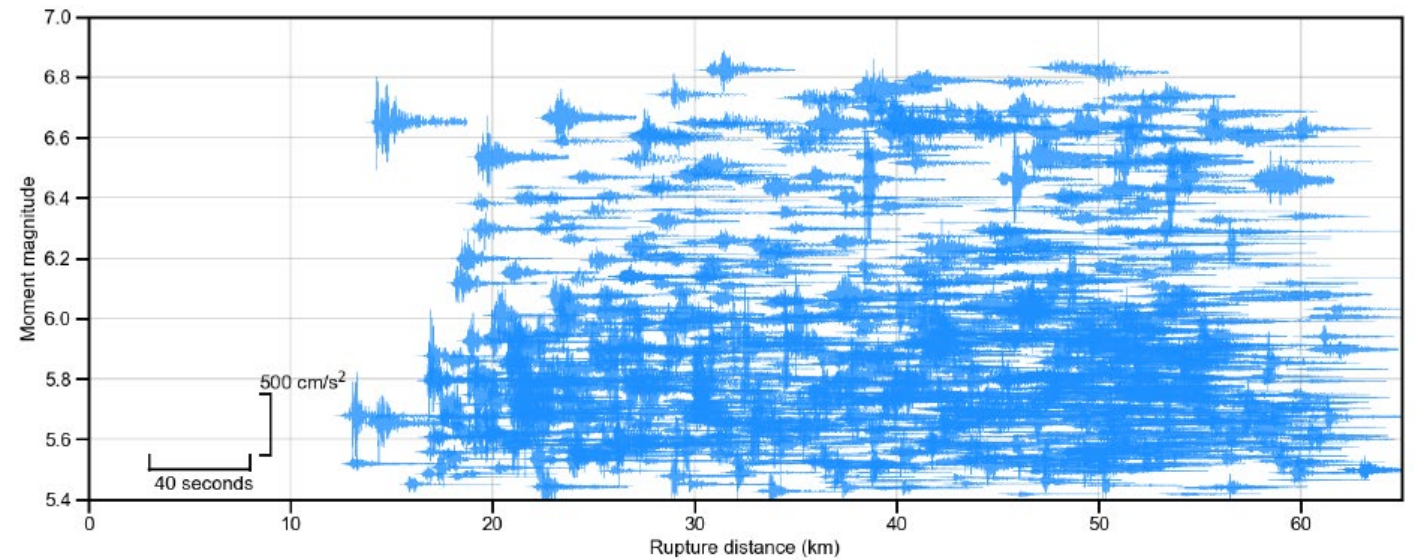
生成モデルを用いた地震動予測手法の開発 ～StyleGAN2の構成



生成モデルを用いた地震動予測手法の開発 ～結果

- 背景地震（一定領域内のどこからでランダムに地震が発生）における地震ハザード評価事例

- 右上図：生成された地震動加速度時刻歴波形（波形の原点が当該地震のマグニチュードと震源距離）
- 右下図：生成された地震動と既往の地震ハザード評価の比較



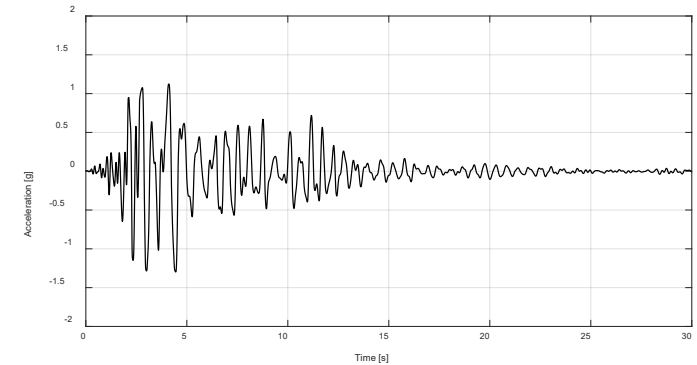
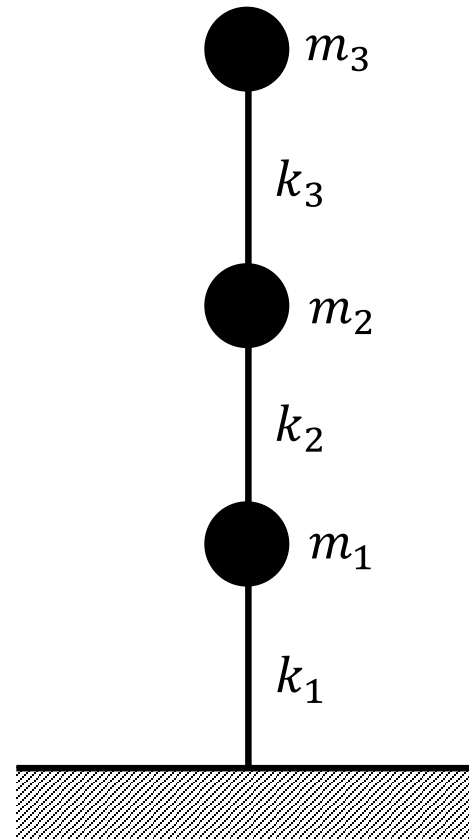
プラント運転時における各種モニタリングデータを活用したデータ駆動的なモデル更新

- プラント運用時に取得されるモニタリングデータに基づき、地震応答解析モデルをデータ駆動的に更新する手法
 - マルチモーダル変分オートエンコーダ（MVAE）に基づくベイズモデル更新手法を構築し、地震観測記録などの高次元データを用いて高忠実度地震応答解析モデルの更新を可能とする枠組みを実現
 - 変分オートエンコーダ（VAE）を用いて、偶然的不確実さと認識論的不確実さを分離しながら、高次元データに基づく確率論的モデル更新（Stochastic Model Updating）を実現

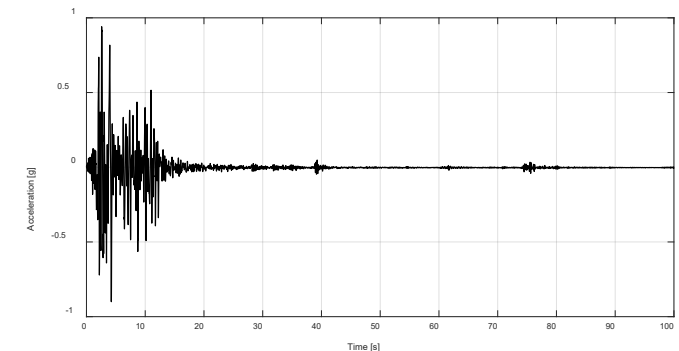
👉 更新したモデルは将来の地震リスク評価に利用

プラント運転時における各種モニタリングデータを活用した データ駆動的なモデル更新

- 様々な解析モデルから得られる応答解析結果を学習したVAEを用いる
- 右図のような観測記録（高次元のベクトルデータ）が得られたときに、観測記録に近い応答を与える応答解析モデルを確率的に抽出

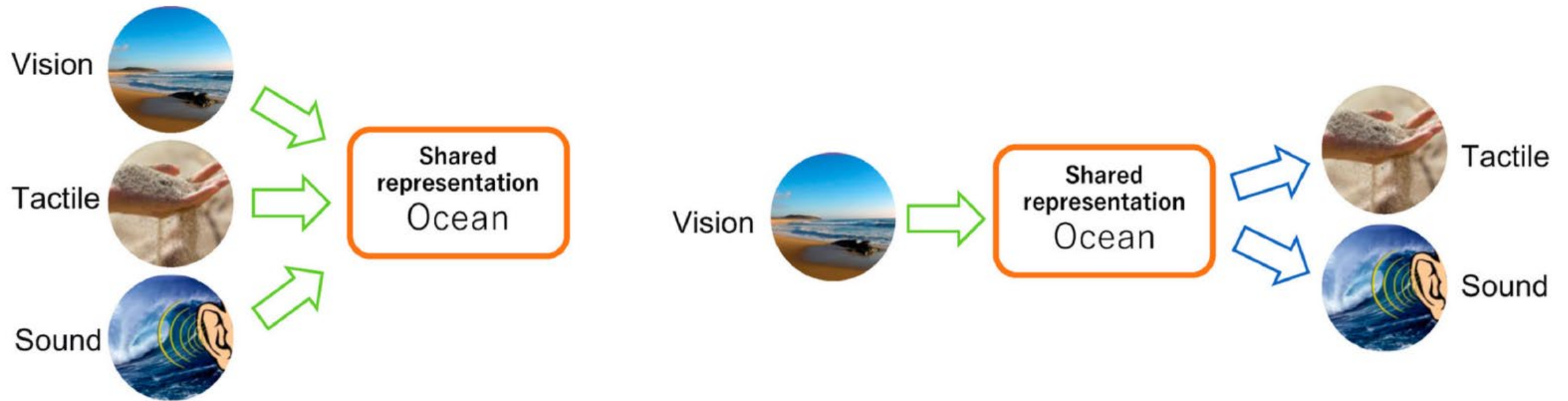


最上階応答加速度



入力地震動

プラント運転時における各種モニタリングデータを活用した データ駆動的なモデル更新～ multi-modal variational autoencoderとその活用

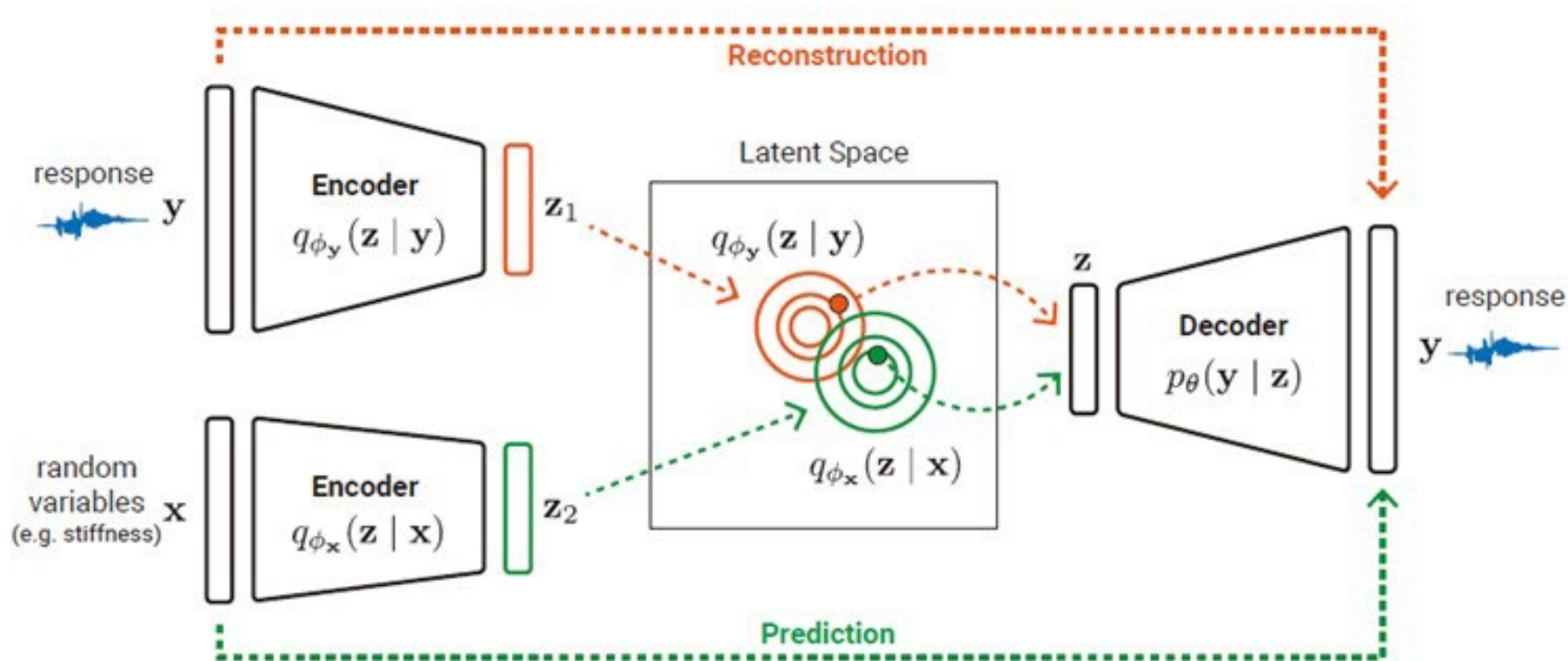


1. Suzuki, Matsuo. 2022. Advanced Robotics, 36: 261–78.

プラント運転時における各種モニタリングデータを活用した データ駆動的なモデル更新～ multi-modal variational autoencoderとその活用

観測記録 y_{obs} を条件とした解析モデルのパラメータ \mathbf{x} の確率分布 $p(\mathbf{x}|y_{\text{obs}})$ は

$$p(\mathbf{x}|y_{\text{obs}}) \propto p(y_{\text{obs}}|\mathbf{x})p(\mathbf{x}) = \left\{ \int p(y_{\text{obs}}|\mathbf{z})p(\mathbf{z}|\mathbf{x})d\mathbf{z} \right\} p(\mathbf{x}) \propto \left\{ \int \frac{p(\mathbf{z}|y_{\text{obs}})}{p(\mathbf{z})} p(\mathbf{z}|\mathbf{x})d\mathbf{z} \right\} p(\mathbf{x})$$



応答解析モデルのパラメータと応答解析結果をmulti modalityとしたVAE

今後の課題

- **地震動生成モデル**：学習データの拡充により海溝型地震などへの適用範囲を拡大
 - **地震応答解析技術**：高忠実度地震応答解析モデルの代替モデル（直接的に時刻歴応答を予測する手法など）の高度化に向けた検討が必要
 - **モデル更新手法**：機械学習モデルの学習に必要な応答解析数の低減など、計算効率の向上に資する改良、および、実プラントデータを用いた実証的検証
- 👉 これらを進めることにより、次世代の地震リスク評価基盤の確立に貢献することを目指す