

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 7 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 産業技術総合研究所

氏 名 : 篠原崇之

研究課題名 : 地震工学分野における説明可能性の高いサロゲートモデルの基礎検討

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 3 1 日

地震工学分野における説明可能性の高いサロゲートモデルの基礎検討

The Fundamental Study of an Explainable Surrogate Model in the Field of Earthquake Engineering

産業技術総合研究所 主任研究員 篠原崇之

（研究計画ないし研究手法の概略）

地震による構造物被害を高精度に評価するためには、地震動入力から構造物応答に至るまでの数値シミュレーションが不可欠である。しかし、従来の地震応答解析や波動伝播解析は計算負荷が大きく、多数の地震シナリオや不確実性を考慮した検討を行う上で大きな制約となっている。とくに、防災計画や都市スケールでの被害想定では、多様な入力条件に対して迅速に解析結果を得ることが求められるため、従来法のみでは十分に対応できない。

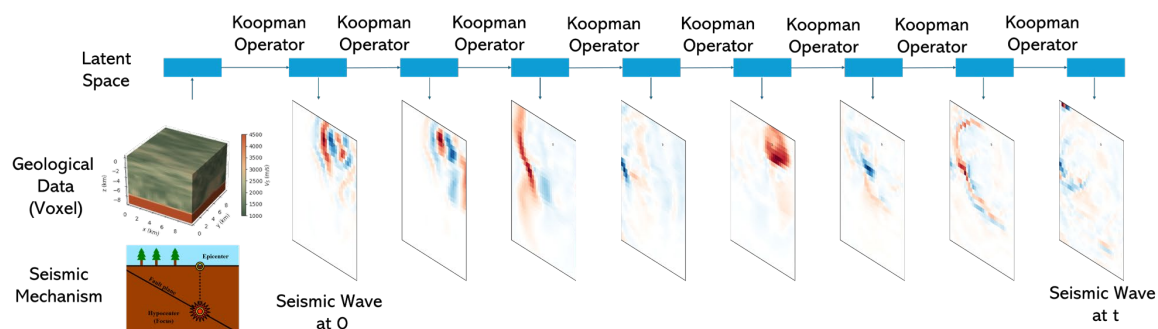


図 1 地盤構造と震源情報から地震動の時系列応答を予測する本研究のサロゲートモデルの概要

本研究では、この課題に対し、地震による構造物被害シミュレーションを高速化するためのホワイトボックス型機械学習サロゲートモデルを構築することを目的とする。地盤構造と震源情報を入力とし、地震動の時系列応答を効率よく予測するサロゲートモデルの全体像を図 1 に示す。サロゲートモデルを用いることで、従来の高コストなシミュレーションを代替または補完し、短時間で多数の解析結果を取得できるようにする。これにより、地震リスク評価の高度化、防災計画の高度化、さらには災害時の迅速な意思決定支援への展開が期待される。

地震工学分野では、入力となる地震動および出力となる構造応答がいずれも時系列データであるため、単純にブラックボックス型の深層学習モデルへ置き換えた場合、時間方向の因果関係や物理的意味が不明瞭となる。この点は、近年の地震波動サロゲート研究においても、同一条件下では高い予測精度を示す一方で、震源深さや震源メカニズムが変化した条件では性能が大きく低下することとして現れており、とくに分布外条件に対する頑健性の確保が重要な課題となっている。

そこで本研究では、時間方向に物理的制約を導入した時系列データ向けサロゲートモデルを提案する。具体的には、各時刻の入力波形および応答状態を低次元の潜在変数へ写像し、その潜在空間における時間発展を非線形力学のスパース同定に基づいて表現する。これにより、単なる入出力近似ではなく、潜在状態の遷移構造を明示的に扱うことが可能となり、従

来のブラックボックス型手法に比べて高い解釈性と説明性を確保することができる。

また、関連研究では、震源情報を物理的に意味のある係数へ分解してモデルに組み込むことで、深さ変化やマグニチュード変化に対する一般化性能が改善することが示されている。本研究でも同様に、時間方向および入力条件に対する物理的拘束をモデル内部へ導入することで、予測精度だけでなく分布外条件に対する頑健性の向上を目指す。さらに、別の関連研究では、地盤構造などの高次元データを潜在空間に圧縮し、その時間発展を線形作用素として扱うことで、計算効率と解釈性を両立し得ることが示されている。本研究では、この考え方も踏まえ、構造物応答の時系列を潜在表現に変換したうえで、支配的な時間発展則を抽出する枠組みを採用する。図2に、本研究で想定する提案モデルの構造、すなわち地盤構造の特徴抽出、潜在変数への圧縮、および時間発展予測の流れを示す。

本研究計画は、主として以下の二段階で実施する。

【1 データの整備】

本来であれば、実建物で観測された加速度記録や応答記録を用いてモデルを構築することが理想である。しかし、本研究はまずサロゲートモデル構築の基礎検討を目的とするため、初期段階では数値シミュレーション結果を真値として用いる。具体的には、地震動入力条件、地盤条件、構造条件を変化させた応答解析を実行し、入力波形と建物応答の対応関係を整理した学習データを整備する。

本研究で用いる地震波動データは、物理シミュレータ **OpenSWPC** を用いて生成する。OpenSWPC は、3次元および2次元の弾性・粘弾性波動伝播を計算可能な有限差分法ベースのシミュレータであり、震源条件、地下構造、自由表面境界条件を与えることで、地表面における三成分速度波形を計算できる。関連研究では、まず地震イベントのメタデータとして、震源位置、深さ、マグニチュード、strike, dip, rakeなどを整理し、それに基づいて OpenSWPC 用の震源ファイルおよび媒質ファイルを生成する。その後、各ケースについて OpenSWPC により波動伝播解析を実行し、得られた自由表面での速度波動場を学習用データとして抽出している。

さらに、OpenSWPC によって得られたシミュレーション結果は、そのまま用いるのではなく、学習に適した形式へ変換する。関連研究では、地盤物性、地形、座標、震源条件を含む入力テンソルと、地表面における三成分速度波形の時系列テンソルとを対応付ける形でデータセットが構築されている。具体的には、各ケースを規則格子上の入力テンソルと出力テンソルへ変換し、複数時刻の波動場を統一的に扱える形へ整理している。これにより、地盤・震源条件から地震動応答を予測するサロゲートモデルの学習が可能となる。

ここでは、単に大量のデータを用意するのではなく、震源条件や入力条件の違いによる性能差を検証できるよう、学習用・検証用・評価用データを体系的に整理する。関連論文では、日本単一地域および複数地域にわたる波動シミュレーションデータを整備し、震源深さ、震源メカニズム、マグニチュード、地域差などを明示的に分けた評価設定を導入している。学習時と評価時で条件が異なる場合にも性能低下の要因を明確に評価できるようにすることで、モデルの真の一般化性能を検証可能としている。

【2 サロゲートモデルの学習】

申請者はこれまで、画像データや点群データを対象とした深層学習手法の研究を進めてきた。本研究では、これら高次元データ処理の知見を活かし、地震動入力と構造物応答の関係を学習するサロゲートモデルを構築する。その際、全体をブラックボックスとして学習するのではなく、各時刻の状態を低次元潜在変数として表現し、その潜在変数の時間発展をホワイトボックス型の力学モデルとして記述する。

具体的には、エンコーダにより各時刻の波形・応答状態を潜在空間へ写像し、その後、潜在空間上での時間発展則をスパース同定により求める。これにより、応答予測の高速化と同時に、どの変数が支配的であり、どのような時間発展構造を有するかを明示的に把握できる。また、必要に応じて、物理量の線形結合や作用素学習の考え方を併用し、深さ変化や入力振幅変化に対しても安定した予測性能を有するモデルへ拡張する。

以上により、本研究では、従来の高コストな地震応答シミュレーションを高速に代替しつつ、モデル内部の力学構造を解釈可能なサロゲートモデルの実現を目指す。将来的には、観測記録を用いた検証、構造被害推定への展開、リアルタイム被害予測への応用へとつなげる予定である。

以上により、本研究では、従来の高コストな地震応答シミュレーションを高速に代替しつつ、モデル内部の力学構造を解釈可能なサロゲートモデルの実現を目指す。将来的には、観測記録を用いた検証、構造被害推定への展開、リアルタイム被害予測への応用へとつなげる予定である。

（実験調査によって得られた新しい知見）

本研究に関連する実験調査を通じて、地震波動や構造物応答のサロゲートモデルでは、同一条件下で高い予測精度を示すだけでは十分ではなく、震源条件や入力条件が変化した場合にも安定して予測できることが重要であることが明らかとなった。各地盤モデルに対する地表最大速度分布について、数値シミュレーションによる真値とサロゲートモデルによる予測値を比較した結果を図3に示す。図3より、地盤条件によって応答分布の形状が大きく変化する場合であっても、サロゲートモデルは全体的な分布傾向を良好に再現しており、地盤構造の違いに応じた応答特性を学習できる可能性が確認された。

一方で、既往の地震波動サロゲートに関する検討では、同一分布内の評価では良好な結果が得られる一方で、震源深さ、震源メカニズム、地域差といった条件が学習時と異なる場合に予測性能が大きく低下することが確認されており、深さ方向の分布外一般化が主要な課題の一つであることが示されている。すなわち、平均的な予測誤差のみを評価するのではなく、

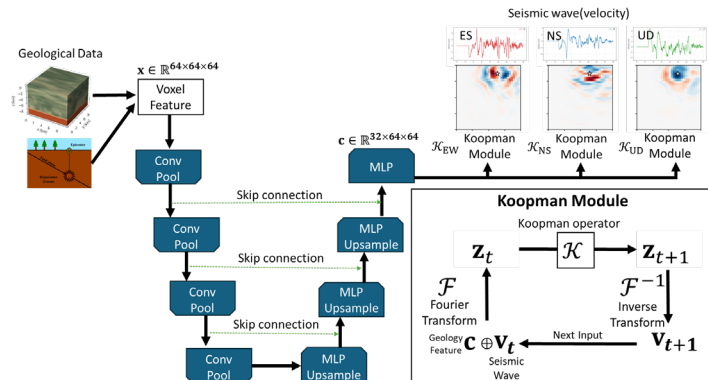


図 2 地盤構造の特徴抽出、潜在変数への圧縮、および時間発展予測から構成される提案モデルの構造

どの物理条件の変化に対してモデルが弱いかを切り分けて検証する必要があることが明らかとなった。

また、単に機械学習モデルの規模を大きくするのではなく、物理的意味をもつ制約をモデル内部に導入することが、一般化性能の改善に有効であることも示唆された。関連する研究では、震源メカニズムを物理的に意味のある係数へ分解し、基底応答の線形結合として波動場を表現することで、震源深さやマグニチュードが変化する条件に対して性能改善が得られている。これは、入力条件と応答の関係に対して物理法則に基づく構造を与えることが、ブラックボックス型モデルでは得にくい頑健性の向上につながることを示している。

さらに、高次元の地盤情報や波動場をそのまま扱うのではなく、潜在空間に圧縮した上で時間発展を記述することにより、計算効率と解釈性を両立できる可能性が確認された。別の関連研究では、三次元地盤ボクセルデータと震源情報を低次元潜在表現に変換し、その時間発展を線形ダイナミクスとして表現する手法が提案されている。この枠組みでは、潜在空間内での時間発展を固有値やモードとして把握できるため、計算の高速化だけでなく、モデル内部の力学構造を分析しやすいことが特徴である。

以上より、本研究で採用する「各時刻の状態を低次元潜在変数として表現し、その時間発展を物理的制約の下で記述する」という方針は妥当であり、地震工学におけるサロゲートモデルに対して、高速性、解釈性、および分布外条件に対する頑健性を同時に高め得ることが新たな知見として得られた。今後は、この知見を踏まえて構造物応答および被害推定へ対象を拡張し、観測記録との比較を通じて実用上の有効性を検証する予定である。

（ 発 表 論 文 ）

Benchmarks for Source-Conditioned Earthquake Wavefield Surrogates in Japan and Multi-Region Settings (投稿中)

Koopman Operator Enhanced 3D Voxel AutoEncoder to Predict 3D Seismic Waves Propagation (投稿中)

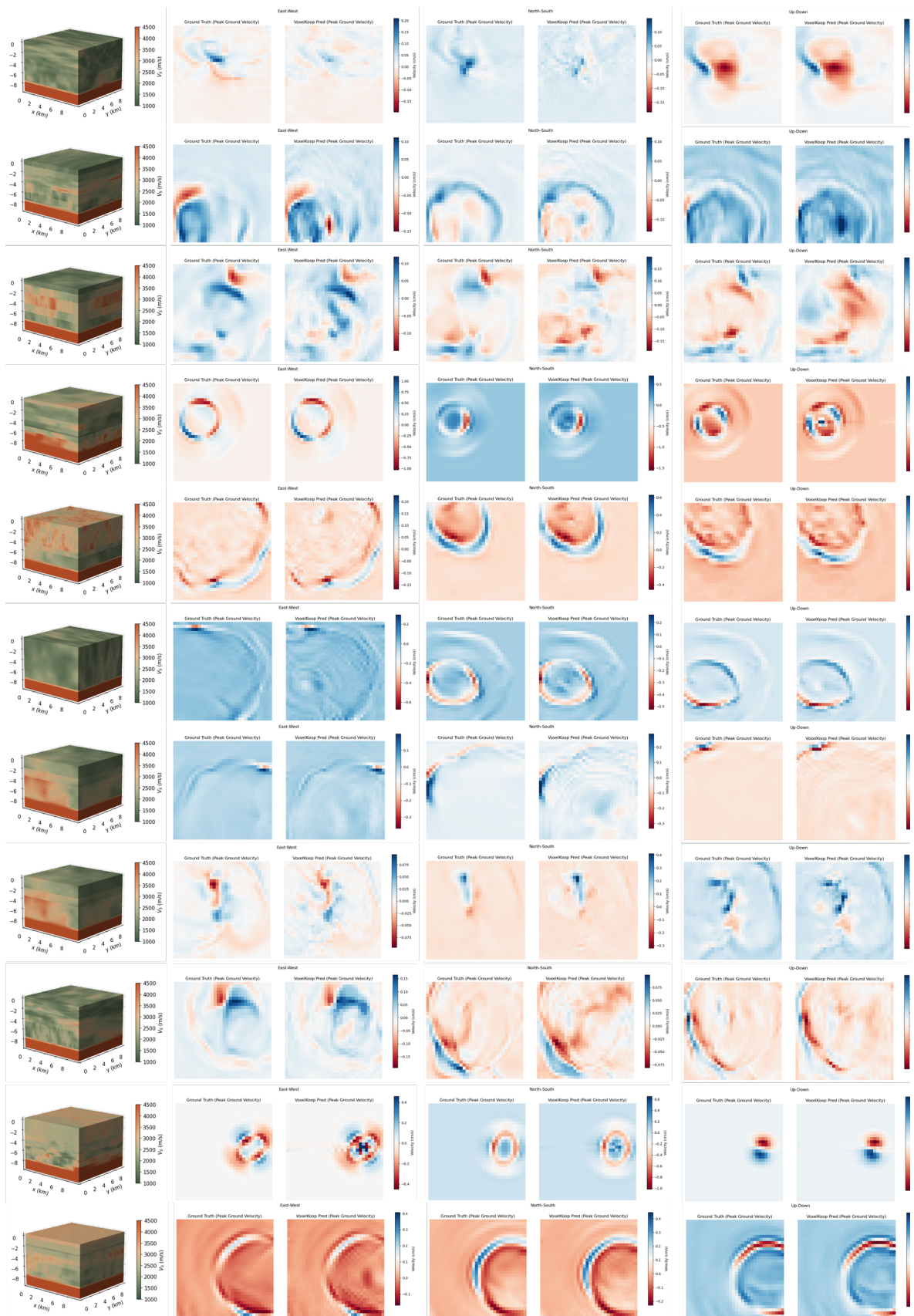


図 3 各地盤モデルに対する地表面最大速度分布について，数値シミュレーションによる真値とサロゲートモデルによる予測値を比較した結果