
弾塑性モデルを使用した PINNsモデル検証

株式会社アストライアーソフトウェア

2025年4月21日

PINNsモデル概要



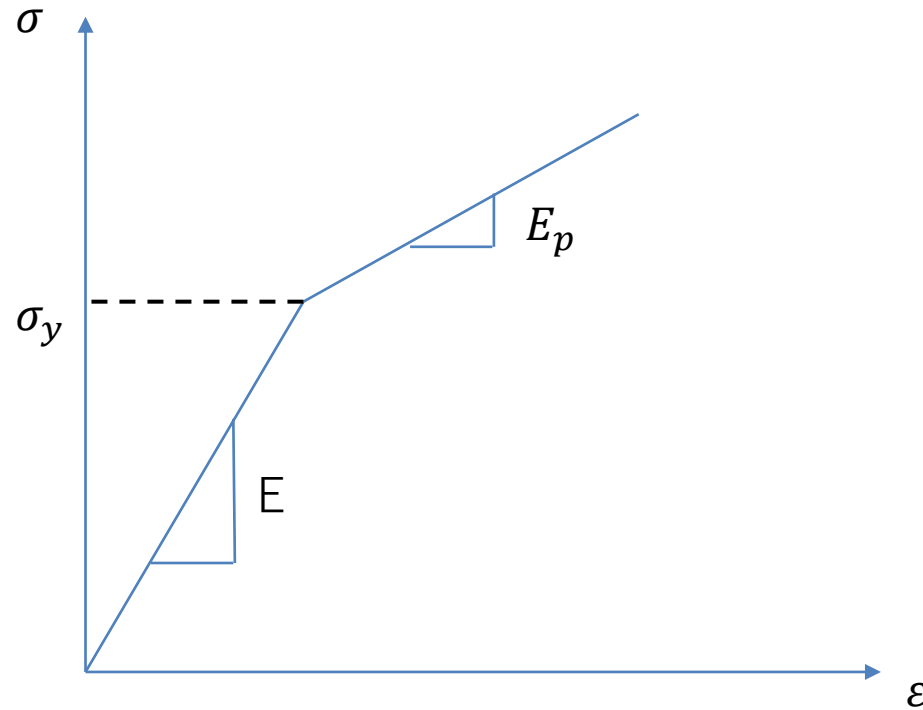
- PINNs(Physics Informed Neural Networks)を用いた片持ち梁弾塑性解析サロゲートモデルの検証を実施した。
- 今回のPINNsモデルでは、物理式とデータ参照両方の損失関数を使用する。
- 物理式では、2直線弾塑性材料モデルをフック則に用いる。平衡方程式、表面力境界条件は変更しない。またデータ参照には別途計算されたFEM解析結果を用いる。
- 参照モデルでは、64個の矩形断面形状の寸法バリエーションを用い、それぞれ25個の計算ステップ出力を用いたため、合計参照データ数はこれらを掛け合わせた1600個となる。

PINNsモデル概要



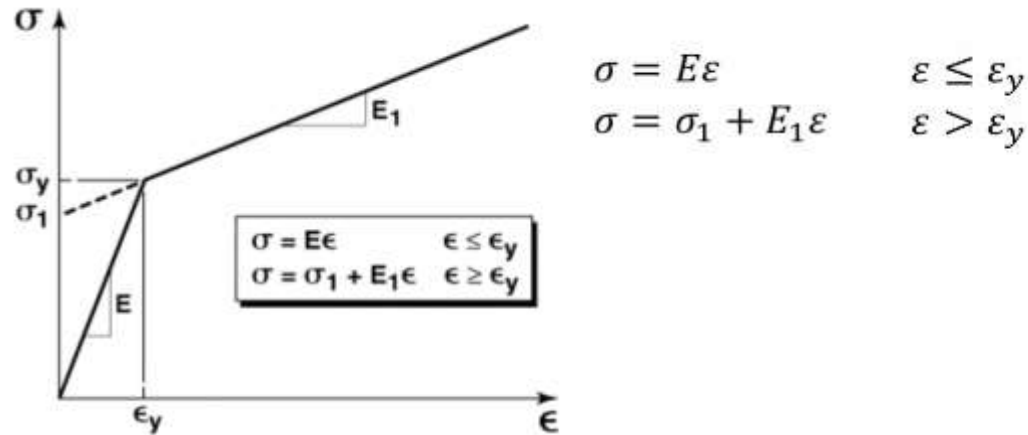
- 以前に実施したPINNsを用いないGNN弾塑性サロゲートモデルは、45000個の参照データを使用したため、断面形状数、計算ステップ数などの対象モデルの違いを考慮しても参照データ数は大幅に削減している。これはPINNs長所である参照データ数の削減を念頭に置いた検証仕様である。
- サロゲートモデルは変位量と応力値の類推モデルをそれぞれ作成する。

弾塑性（2直線）材料モデル



ヤング率 E は $200\text{e}9\text{N/m}^2$ 、ポアソン比は 0.3
降伏応力は 400N/m^2
線形ひずみ硬化係数 E_p は $22222.22\text{e}6\text{N/m}^2$

2直線モデルの定式化（フック則）



塑性材料理論において、セカント係数は、すでに塑性変形を受けた材料の剛性を表す方法であり、次のように定義されます。

$$E_{sec} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

2直線モデル材料では、 E_{sec} は次のように計算されます。

$$E_{sec} = E \quad \sigma \leq \sigma_y$$
$$E_{sec} = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y} + E_1 \quad \sigma \geq \sigma_y$$

$$\epsilon_x = \frac{1}{E_{sec}} (\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z))$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E_{sec}} (\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z))$$

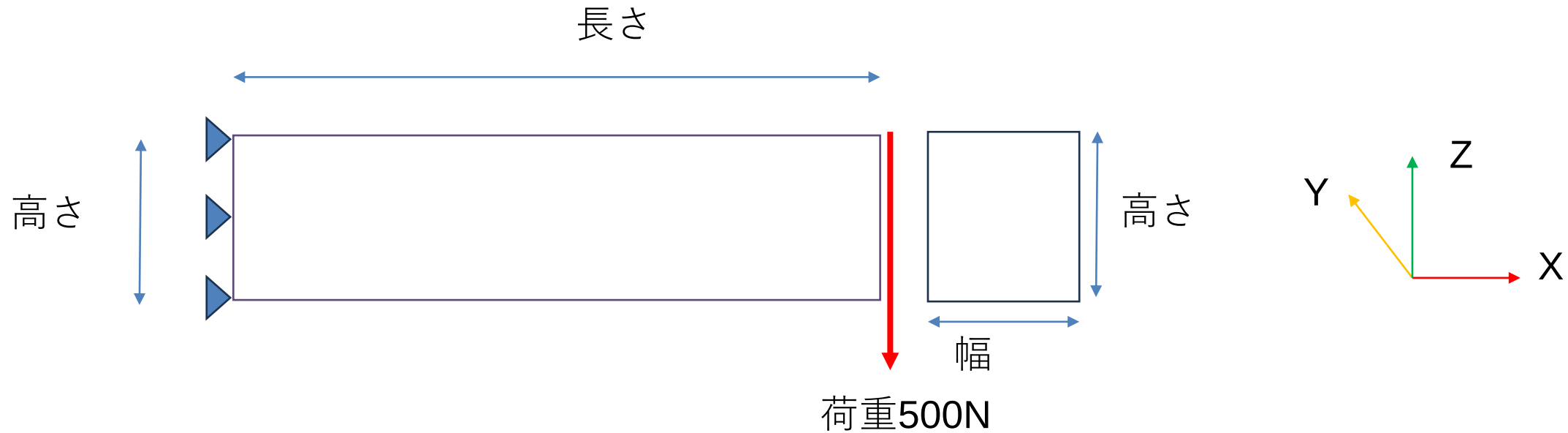
$$\epsilon_z = \frac{1}{E_{sec}} (\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y))$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_p}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G_p}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G_p}$$

矩形断面片持ち梁モデル



データセット:

高さ、幅は[5,7,10,12]から任意に選択されます。

長さは[80,100,120,140]から任意に選択されます。

荷重は0から500Nまで負荷されます。

データセットの総数は64です。

変位類推モデル検証結果

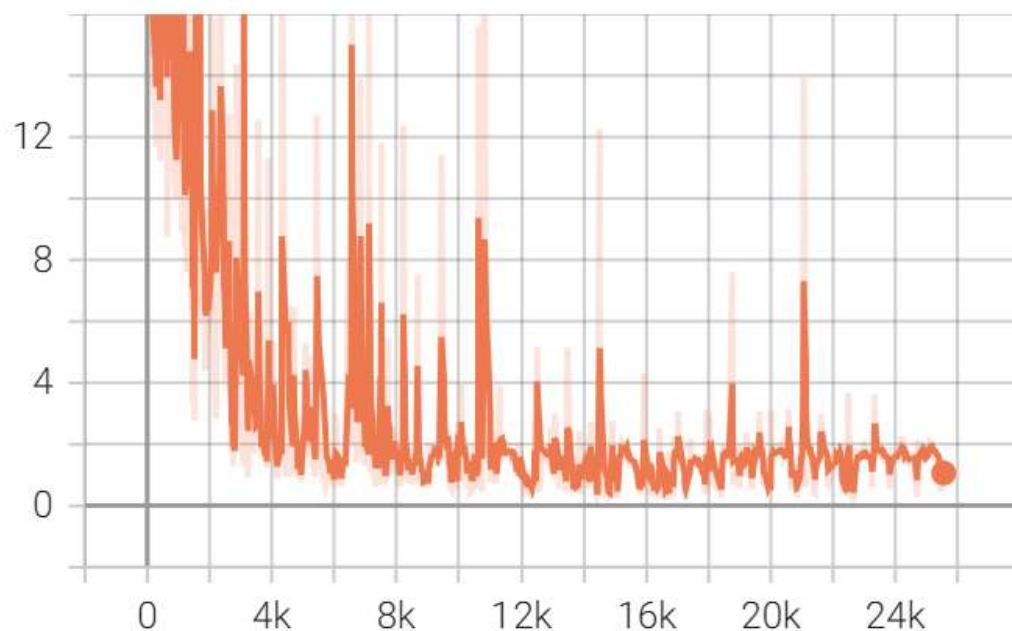


- トレーニング中の損失関数の履歴をイタレーション毎、エポック毎に示した。トレーニング初期はイタレーション毎に変動が激しいが、トレーニングが進むにつれて変動が収束していくことがわかる。正常な損失関数の収束と判断される。
- 注目している梁のたわみ量（Z方向変位）の精度は、R2値で0.97であり、十分にトレーニングされている。たわみ量が大きくなると類推値は参照値より小さな値に抑えられる傾向がある。
- 形状サイズ5x5x80（幅、高さ、長さ）について、類推結果を検証した。自由端のZ変位は、参照値（Actual）と良い一致を見せている。塑性域に入ると誤差が大きくなるため、FEM解析の弾塑性モデルとの差異などをさらに検証する必要がある。また変形性状もよく一致している。

損失関数の履歴

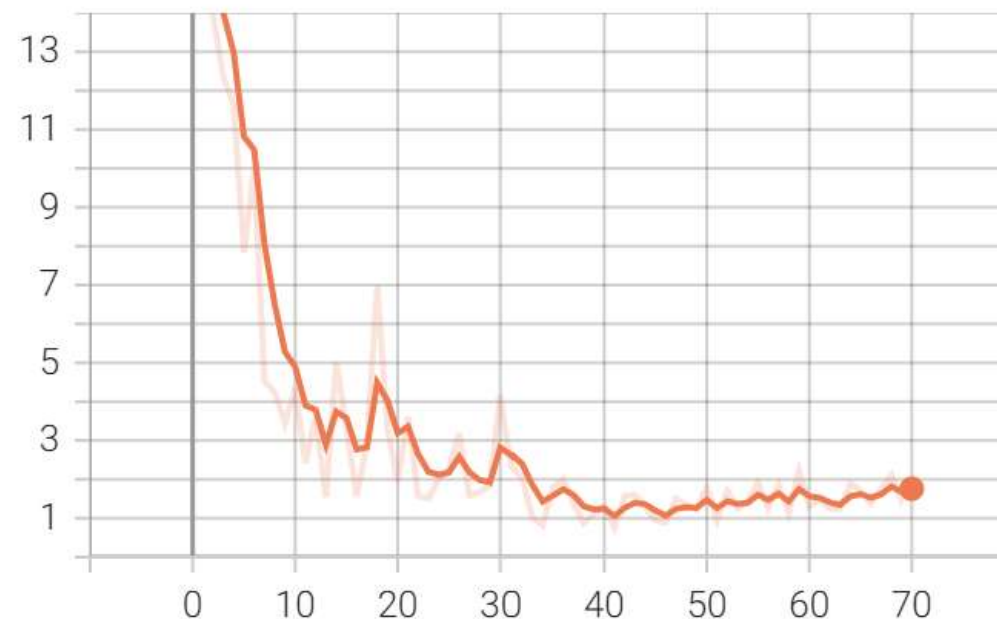


train_loss
tag: train_loss



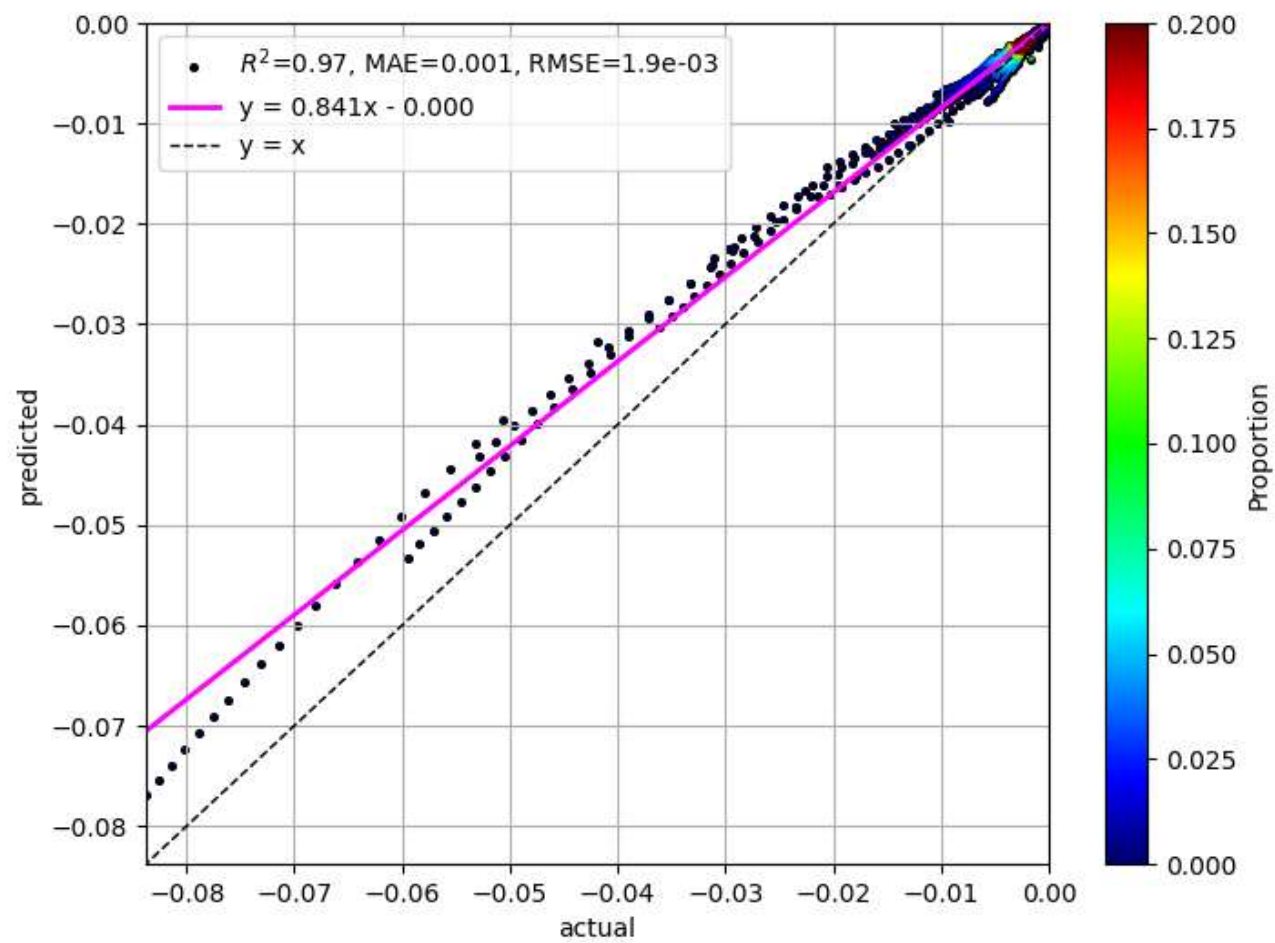
イタレーション毎のプロット

epoch_train_loss



エポック毎のプロット

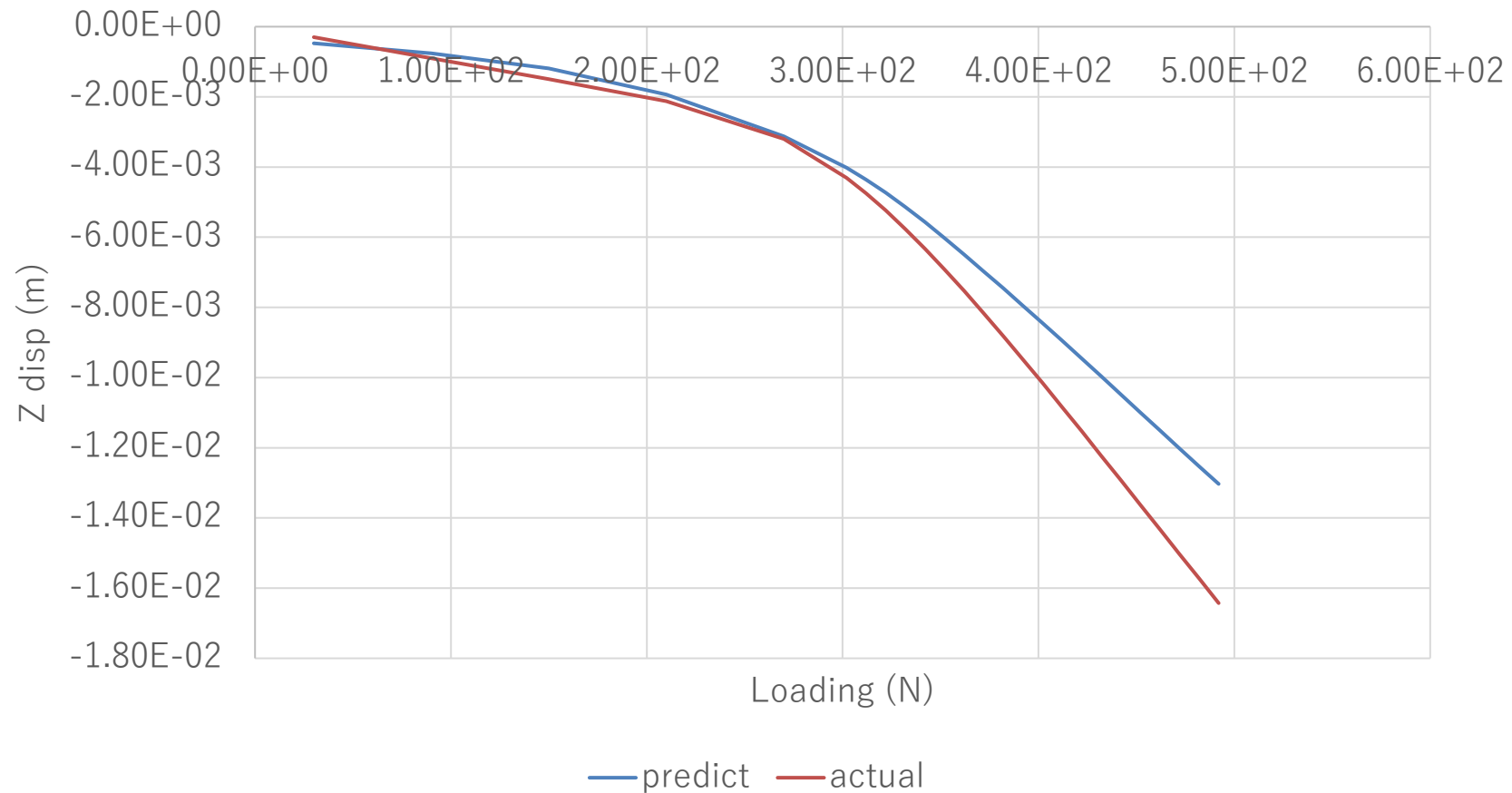
最大Z変位の精度



荷重に対する自由端Z変位の履歴 形状サイズ 5x5x80



Z Displacement History at front face



Z変位分布比較

形状サイズ 5x5x80 – 荷重 492N



類推値

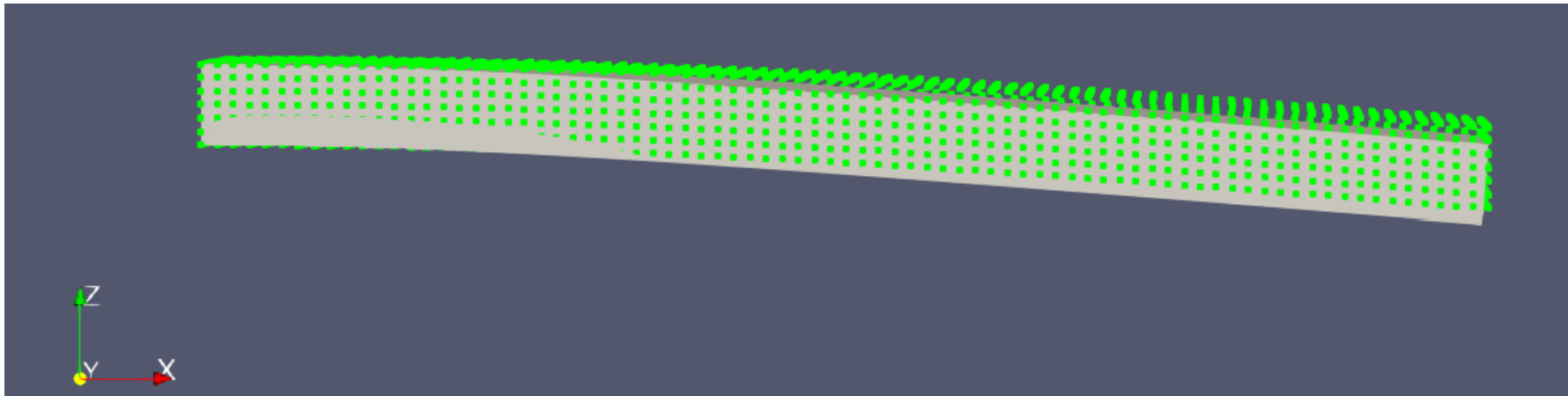


参照値

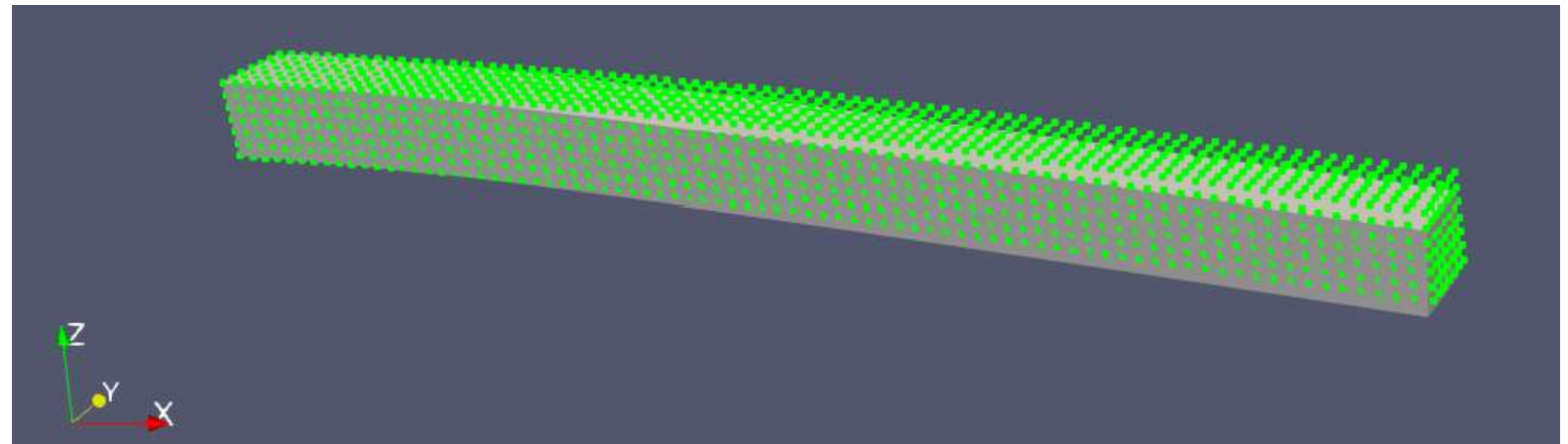


変形性状比較

形状サイズ5x5x80 – 荷重 492N



ソリッド：参照値
緑点：類推値



応力類推モデル検証結果

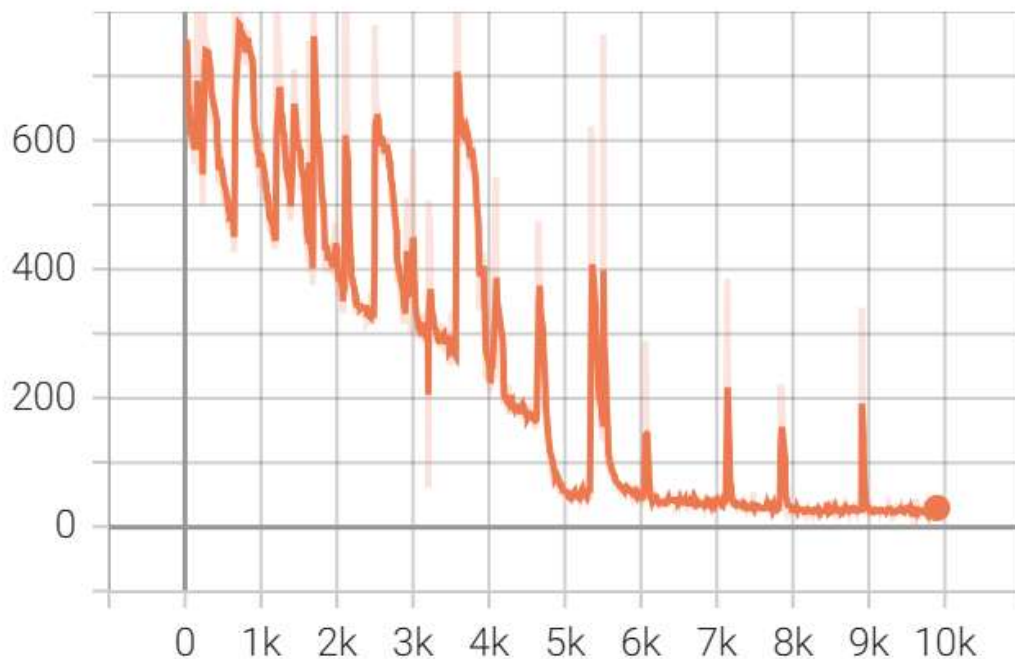


- トレーニング中の損失関数の履歴をイタレーション毎、エポック毎に示した。トレーニング初期はイタレーション毎に変動が激しいが、トレーニングが進むにつれて変動が収束していくことがわかる。正常な損失関数の収束と判断される。
- 曲げ挙動による支配的な応力となる直応力 σ_x 値の精度は、R2 値0.96であり、十分な精度までトレーニングされた。
- また直応力 σ_x 最大値と最大たわみ量の履歴グラフを示す。類推値は参照値の下側に配置されるが良い一致を示している。応力値の差異については、応力出力位置や保管方法などを詳しく検証する必要がある。また応力の分布についても一致した。

損失関数の履歴

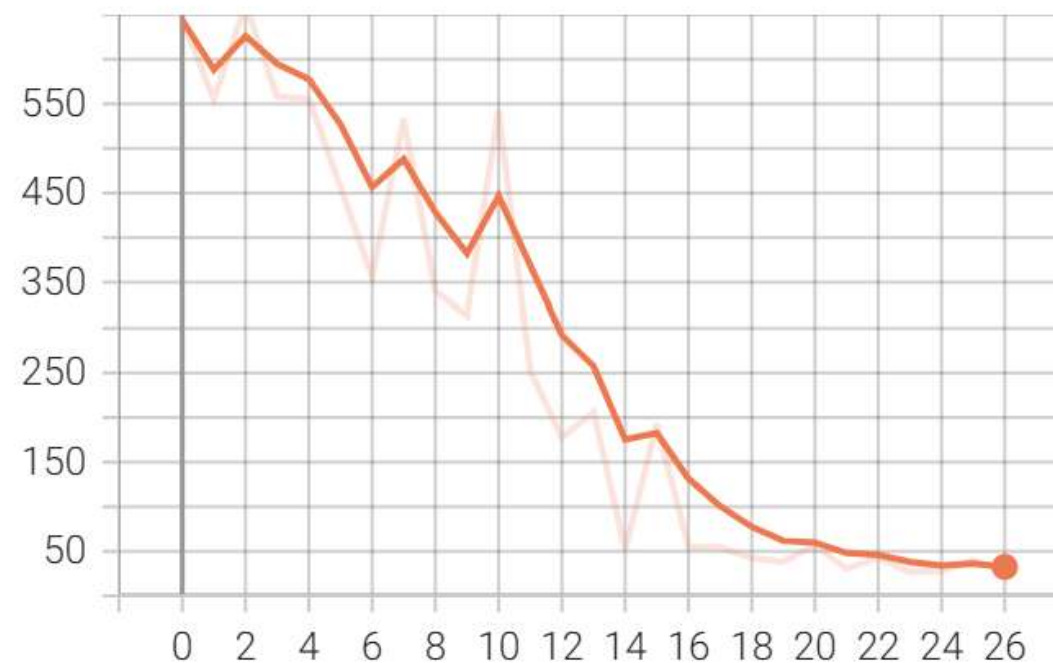


train_loss



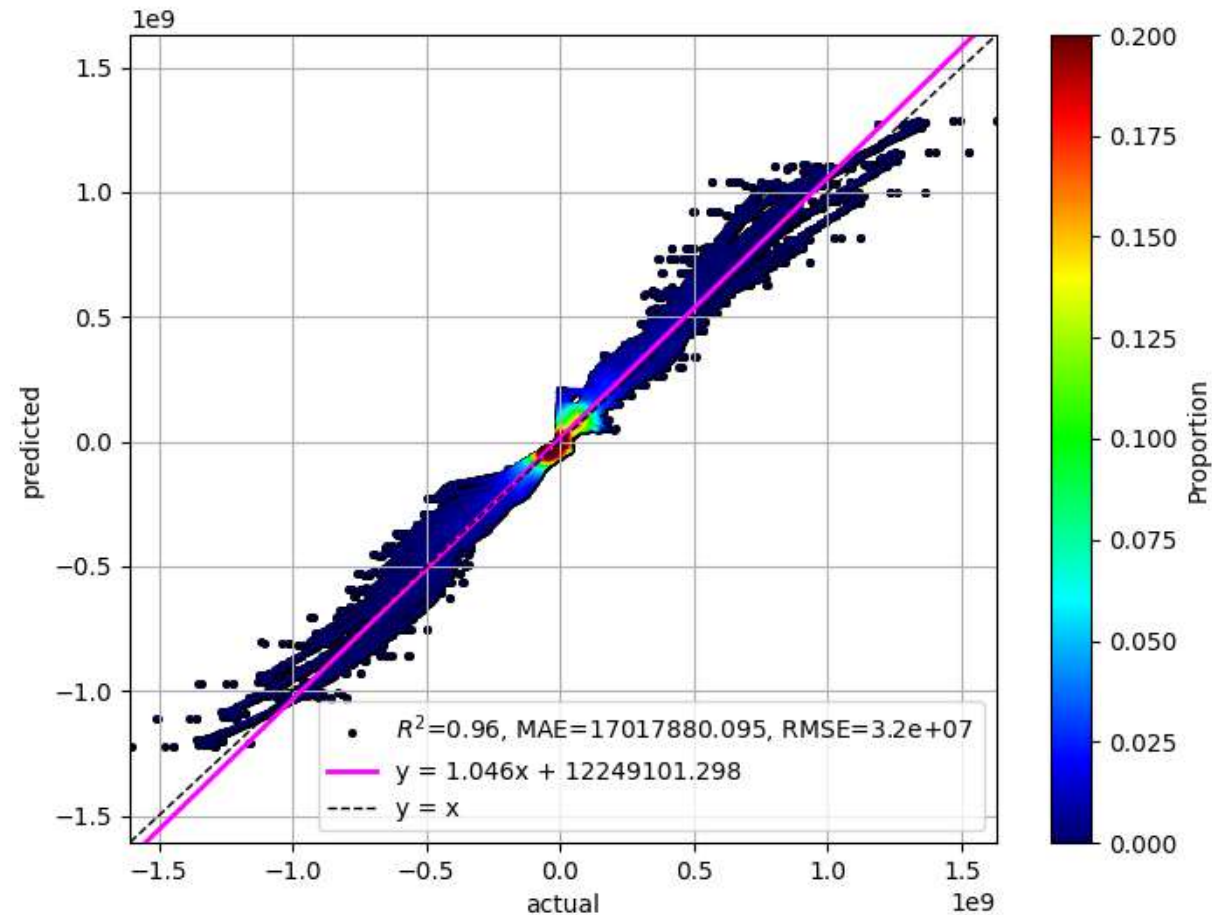
イタレーション毎のプロット

epoch_train_loss

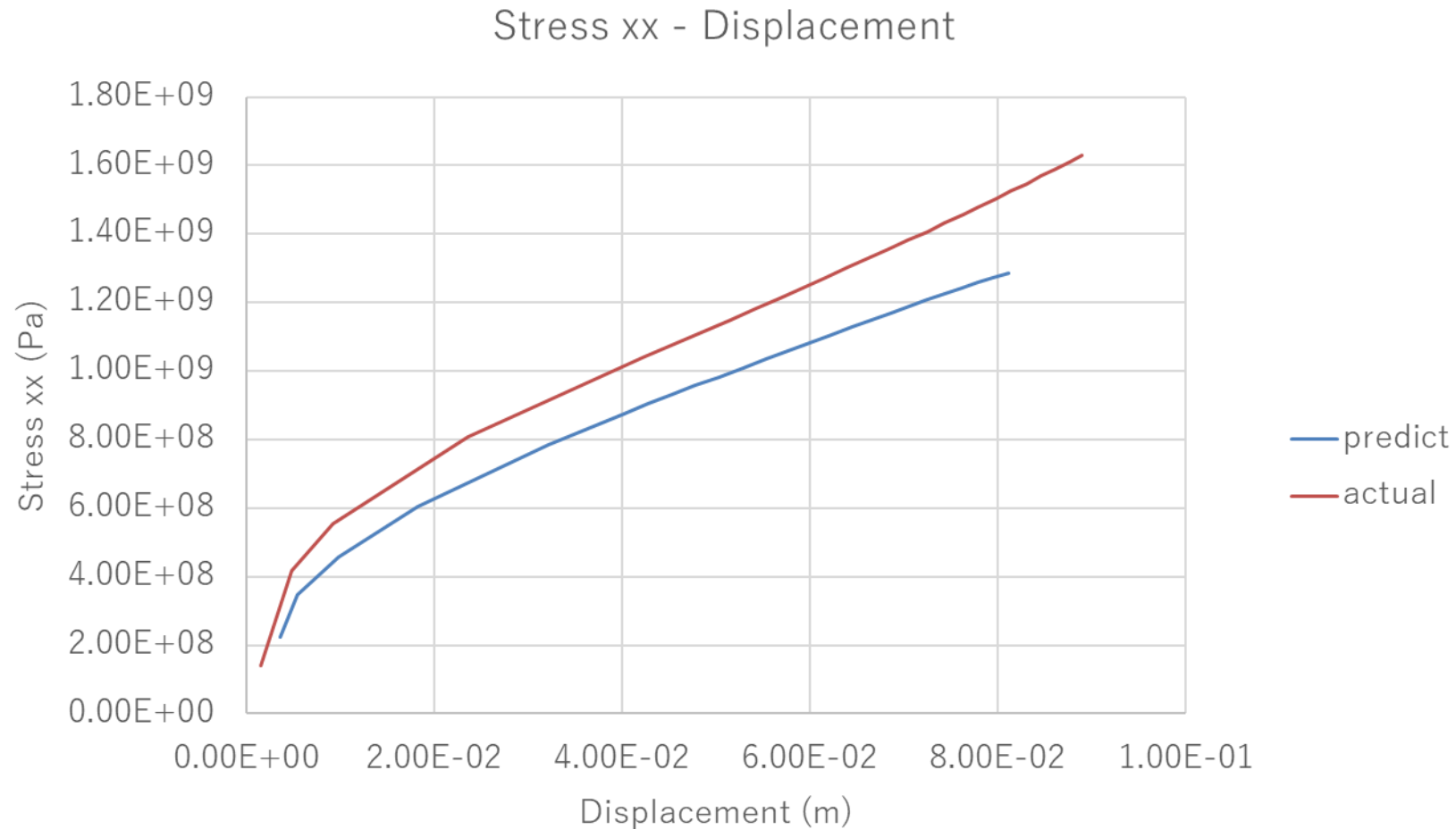


エポック毎のプロット

直応力 σ_x の精度



最大変位量ー最大応力 σ x履歴 形状サイズ 5x5x140

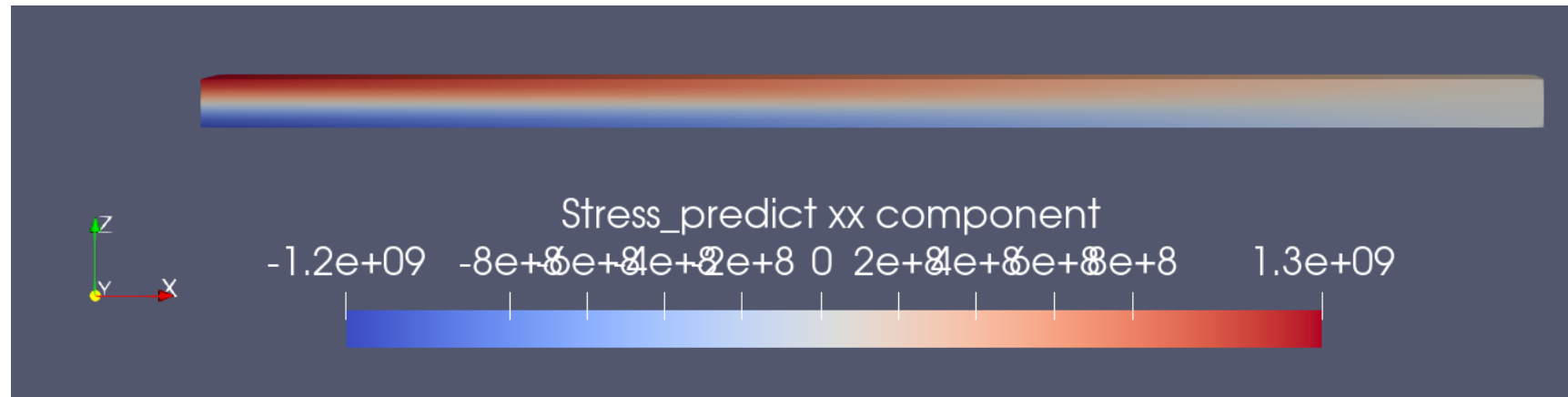


直応力 σ_x 分布比較

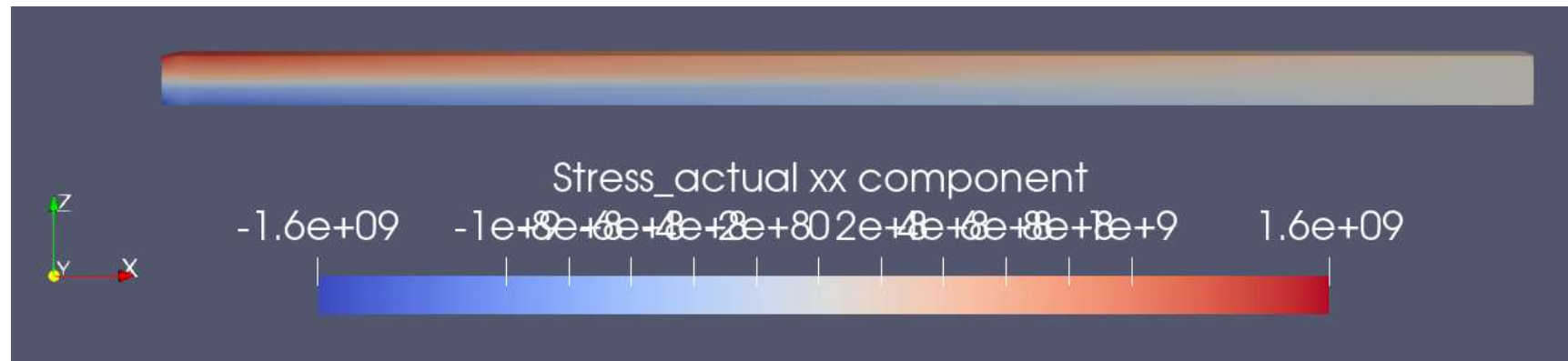
形状サイズ 5x5x140 – 荷重 492N



類推値



参照値



まとめ



- PINNsを用いた弾塑性解析サロゲートモデルの検証を行い、変位、応力などが荷重レベルによって変化する非線形挙動を観察した。
- PINNsを使用したため、参照モデル数を64寸法バリエーション、25計算ステップのみに制限しトレーニングを実施したが、参照解に沿った滑らかな非線形な挙動が観察された。
- FEM解析参照解との差異については、弾塑性モデルや応力出力方法などの検討といったFEM的側面と、トレーニングモデルの増強や誤差関数の改善といった機械学習的側面の両方から改善を図っていく。

以上