
汎用シェル形状における PINNsサロゲートモデル検証

株式会社アストライアーソフトウェア

2025年6月27日

概要



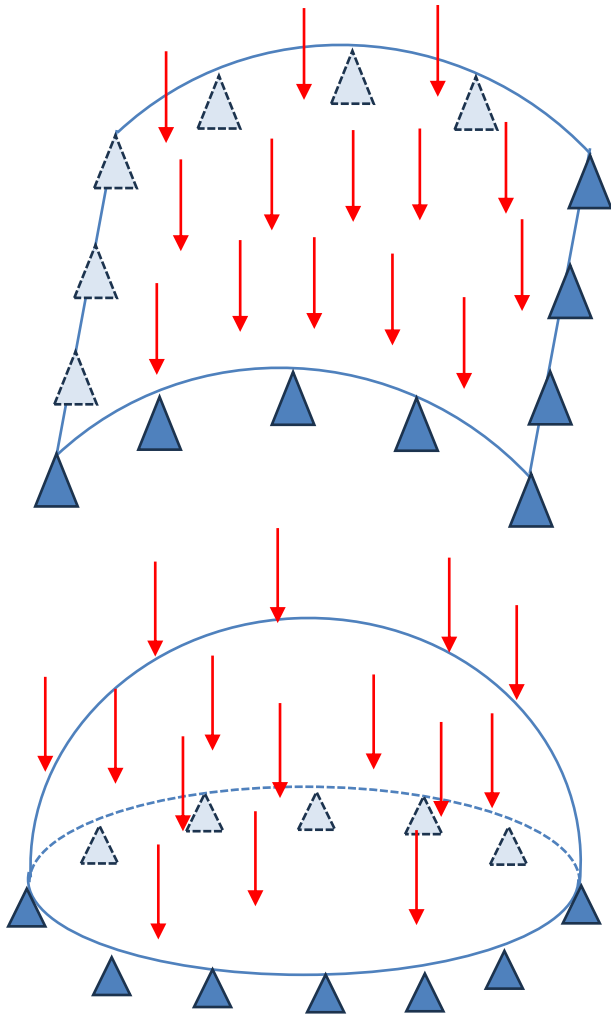
- 2024年12月にシェル要素のサロゲートモデルについて報告を行ったが、モデル形状は円盤と方形平板に限定され、拘束条件も固定されていたため、汎用性に乏しかった。
- 今回は一般的な汎用シェル形状を対象として想定するため、モデル形状を曲面板とし、拘束条件、荷重条件も節点ごとに設定可能とした。
- モデル形状は曲面をもった3D形状であるが、トレーニングモデル作成の容易さを考慮し、式によるパラメータモデルとした（4ページ、5ページ）。
- 損失関数に使う物理式は薄肉シェル理論に従い、面外せん断を含まないモデルとした（6ページ）。
- AIモデルの入力は節点ごとの座標値と拘束条件、荷重条件などであるため、節点ごとに拘束・荷重条件が変更可能であり、対象モデルの汎用性を高めた（7ページ）。

概要



- 変位類推モデルについての検証結果は、損失関数の収束が順調に推移し（9ページ）、また精度もR2値0.81以上であり、十分にトレーニングは収束している（10ページ）。
- 変位量の分布や変形性状もFEMの参照解とよく一致している（11、12ページ）
- また応力類推モデルについての検証結果は、損失関数の収束が順調に推移し（16ページ）、また精度もR2値0.99以上であり、十分にトレーニングは収束している（17ページ）。
- ミーゼス応力の分布もFEMの参照解と優れた一致を見せている（18-21ページ）。
- 以上の結果から本報告で使用した汎用性の高いシェル要素サロゲートモデルは十分な性能を示している。

対象モデル形状



長方形の曲面板と半球板の自由端を固定拘束し、範囲[3000, 10000] N/m²でランダムに選択された分布荷重を負荷します。

長方形の曲面板は、以下の式を適用して作成されます。
長さや幅が[1, 5]の範囲でランダムに選択される平らな長方形板において、高さZは、

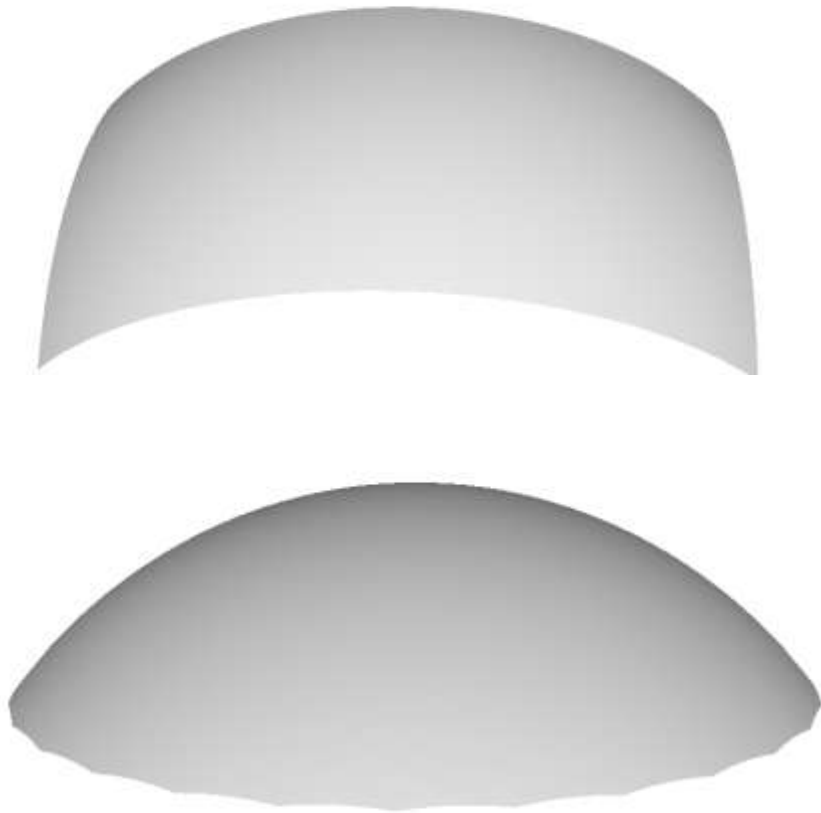
$$z = \sqrt{1.8 * \sqrt{width^2 + length^2} - x^2 - y^2}$$

半球板は、半径が[0.5, 2.5]の範囲でランダムに選択される平らな円板に、高さzを以下の式を適用することによって作成されます。

$$z = \sqrt{2 * 1.8 * radius - x^2 - y^2}$$

薄肉シェル理論を適用します。

対象モデルのプロパティなど



$$E = 10.92e11 \text{N}/m^2$$

$$\nu = 0.3$$

$$\text{板厚} = 2.54 \text{mm}$$

データセット数: 280

損失関数の定義 (PINNs)

ネットワークのトレーニングのための損失関数は、以下の弱形式に基づいて定義されます。

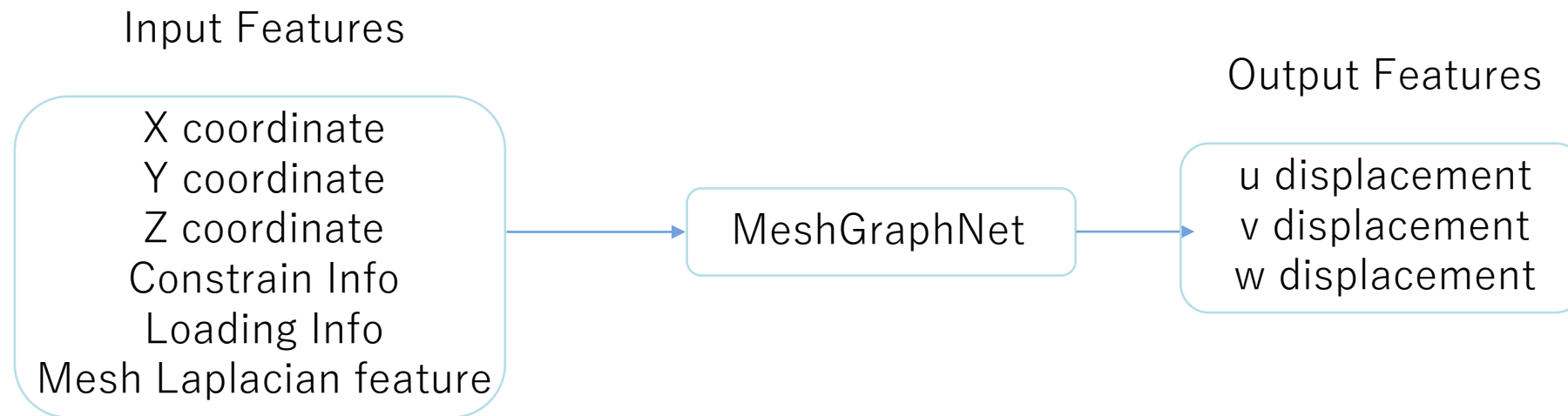
$$L_{weak} = \underbrace{\frac{1}{2} \varepsilon_m : C_m : \varepsilon_m}_{\text{面内エネルギー}} + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{t^3}{12} \varepsilon_b : C_b : \varepsilon_b}_{\text{曲げエネルギー}} - W_{ext}$$

また、

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & -z \frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & -z \frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & -2z \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{Bmatrix}$$

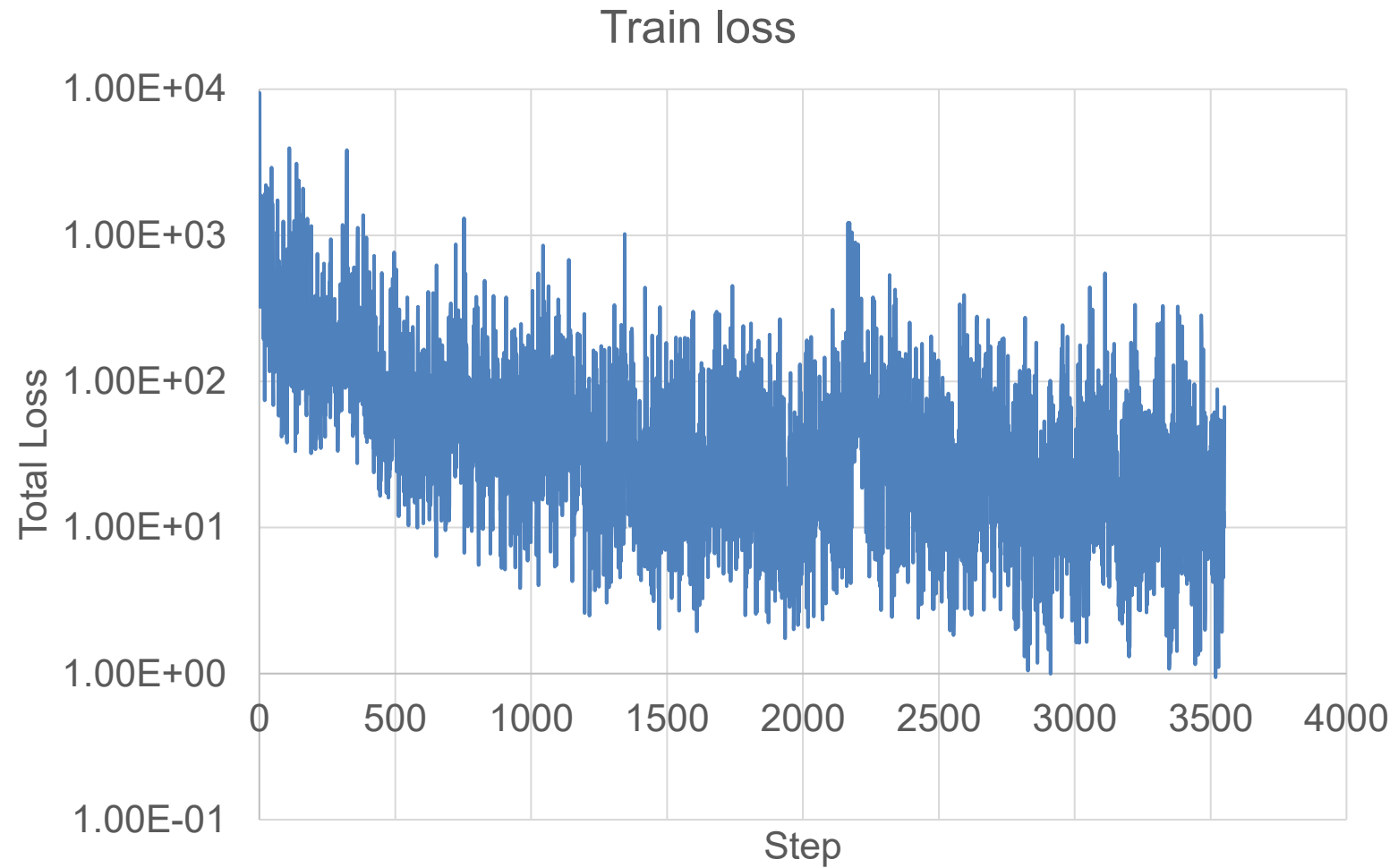
面内ひずみ
曲げひずみ

AIモデルの設計概要



変位類推モデル

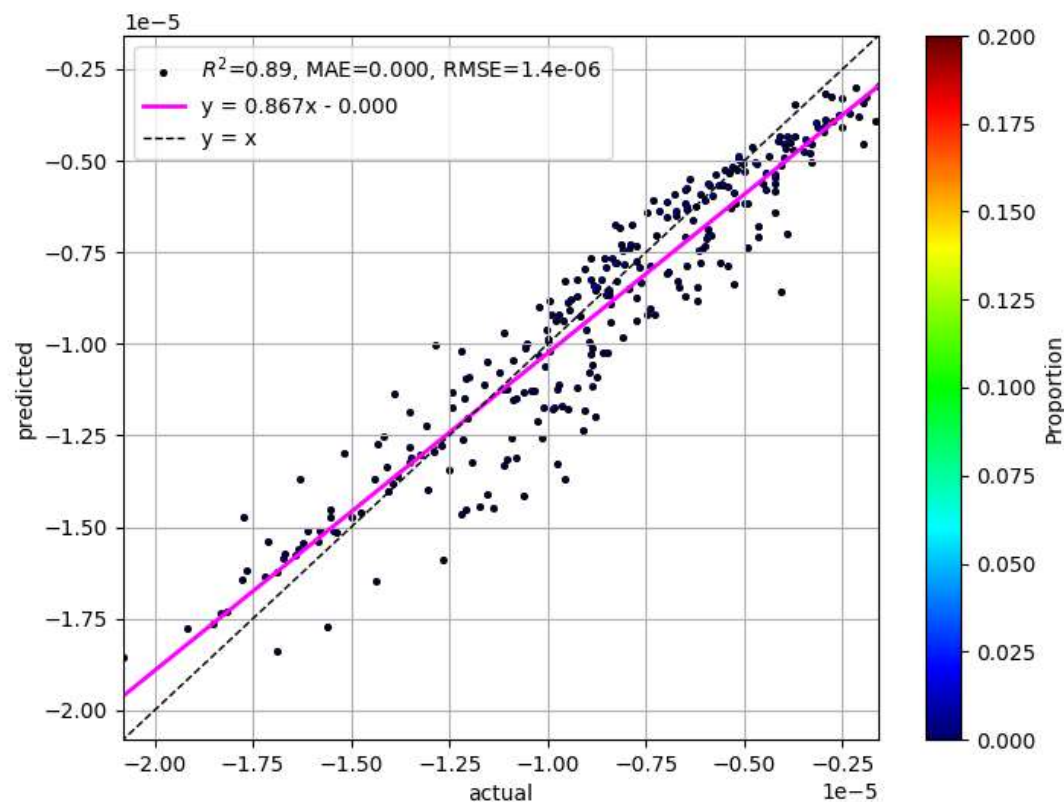
損失関数値の推移



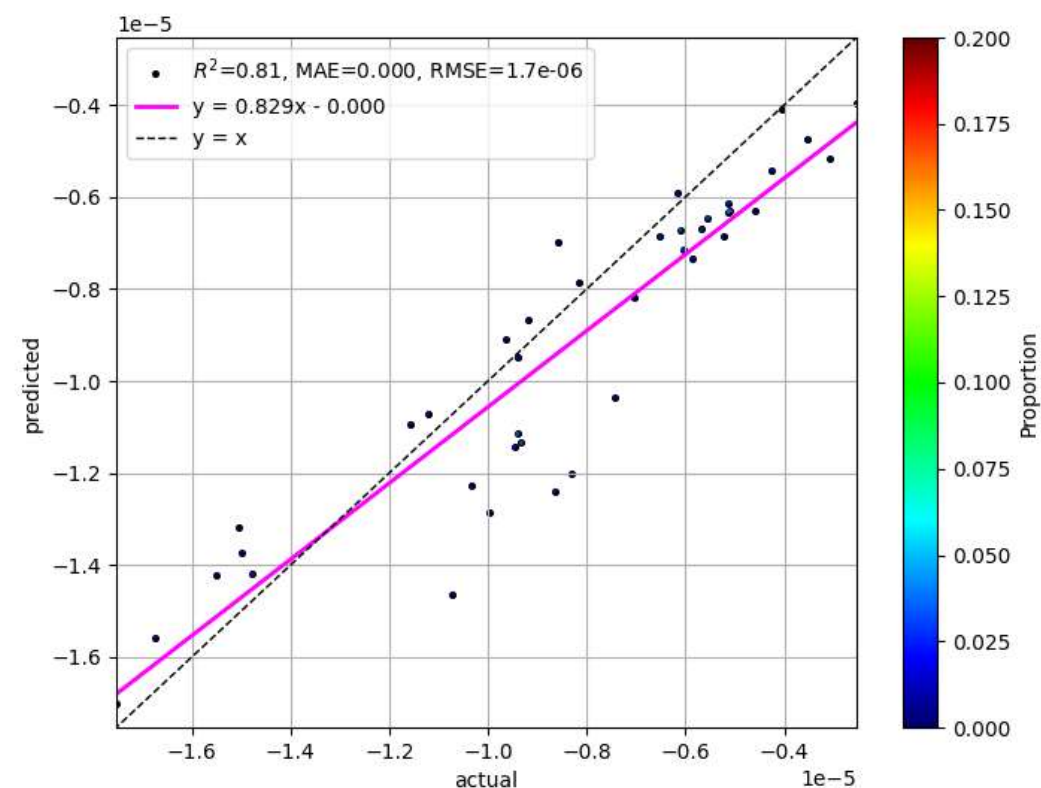
参照値、類推値の相関グラフ



Train set



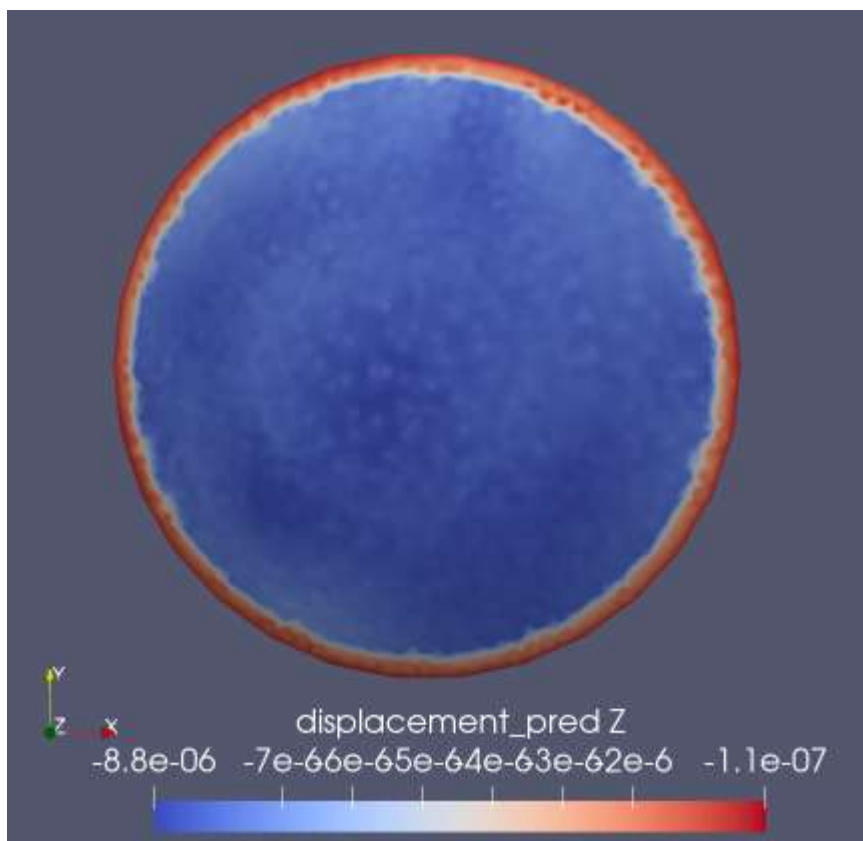
Test set



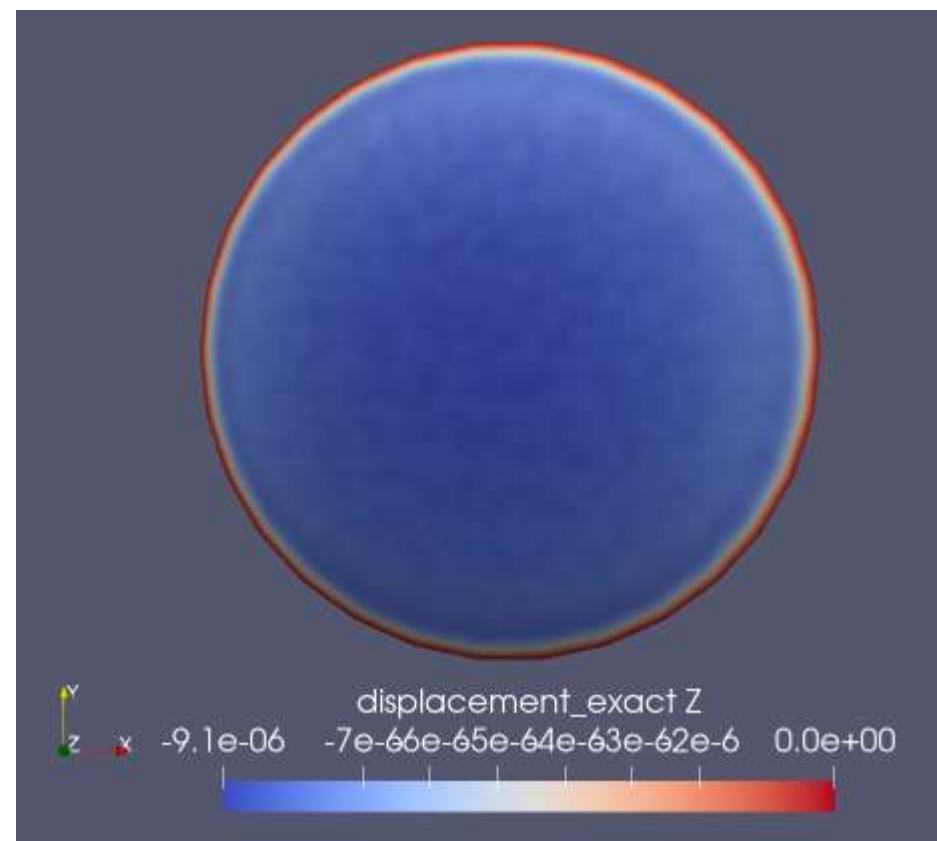
Z変位量の比較（半球板）



類推値

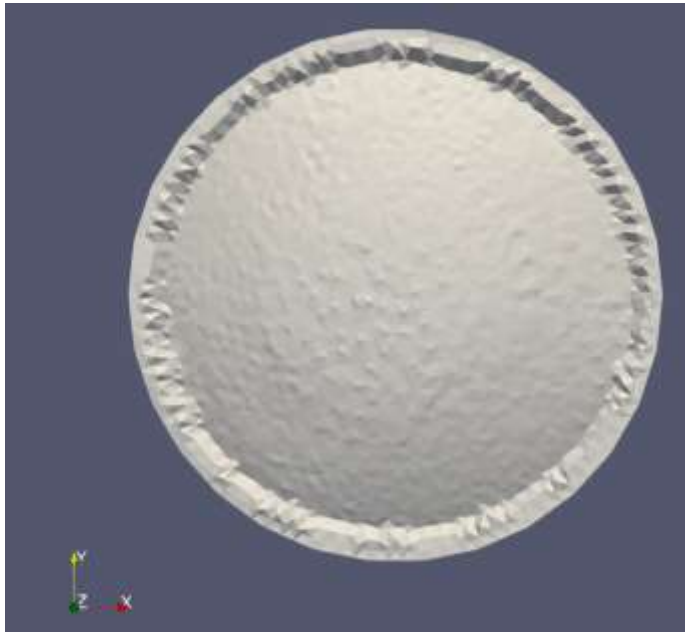


参照値



変形性状の比較（半球板）

類推値



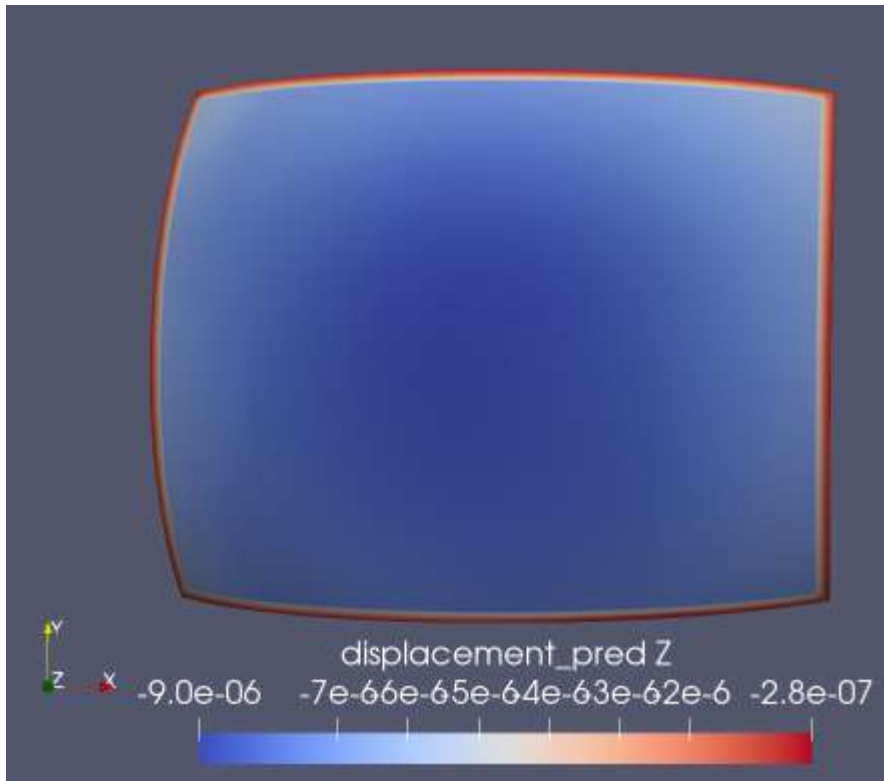
参照値



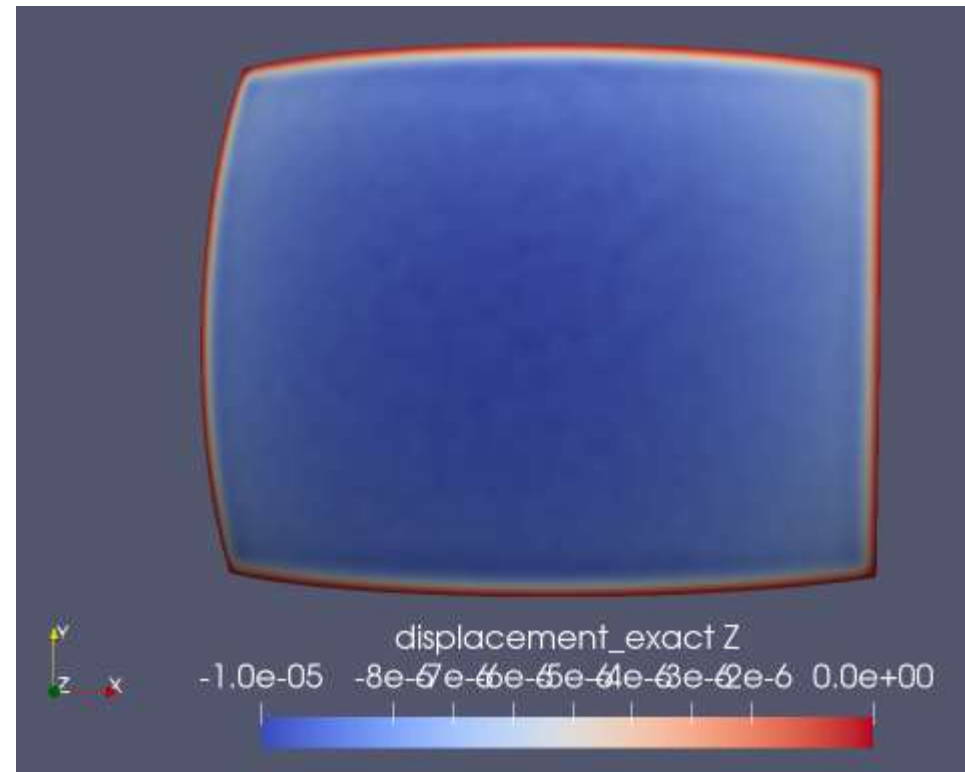
Z変位量の比較（方形曲面板）



predict



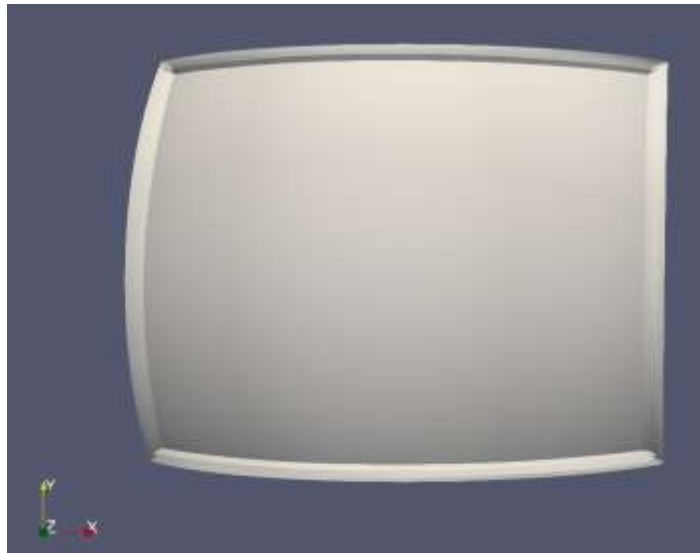
actual



変形性状の比較（方形曲面板）



類推値

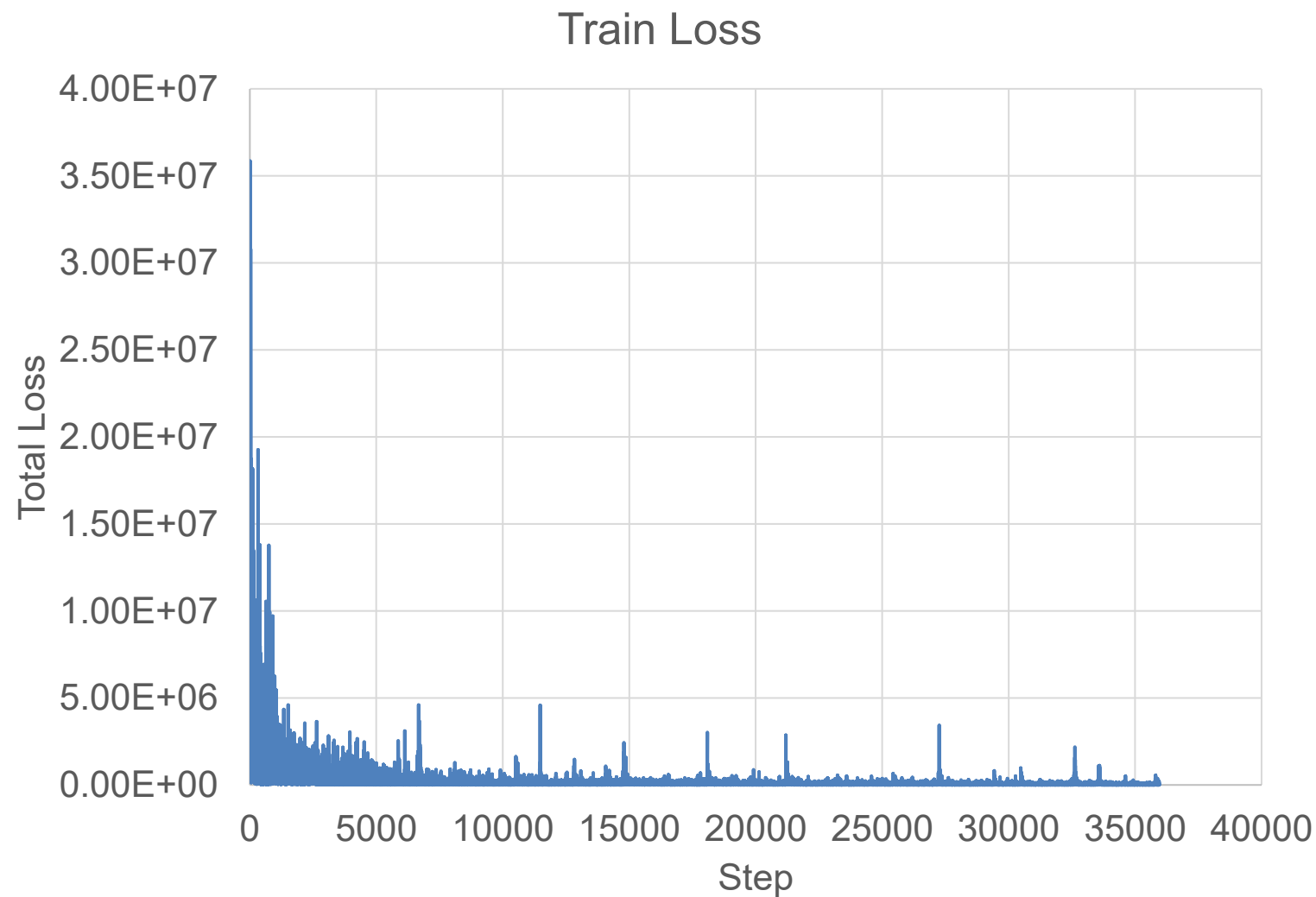


参照値



応力類推モデル

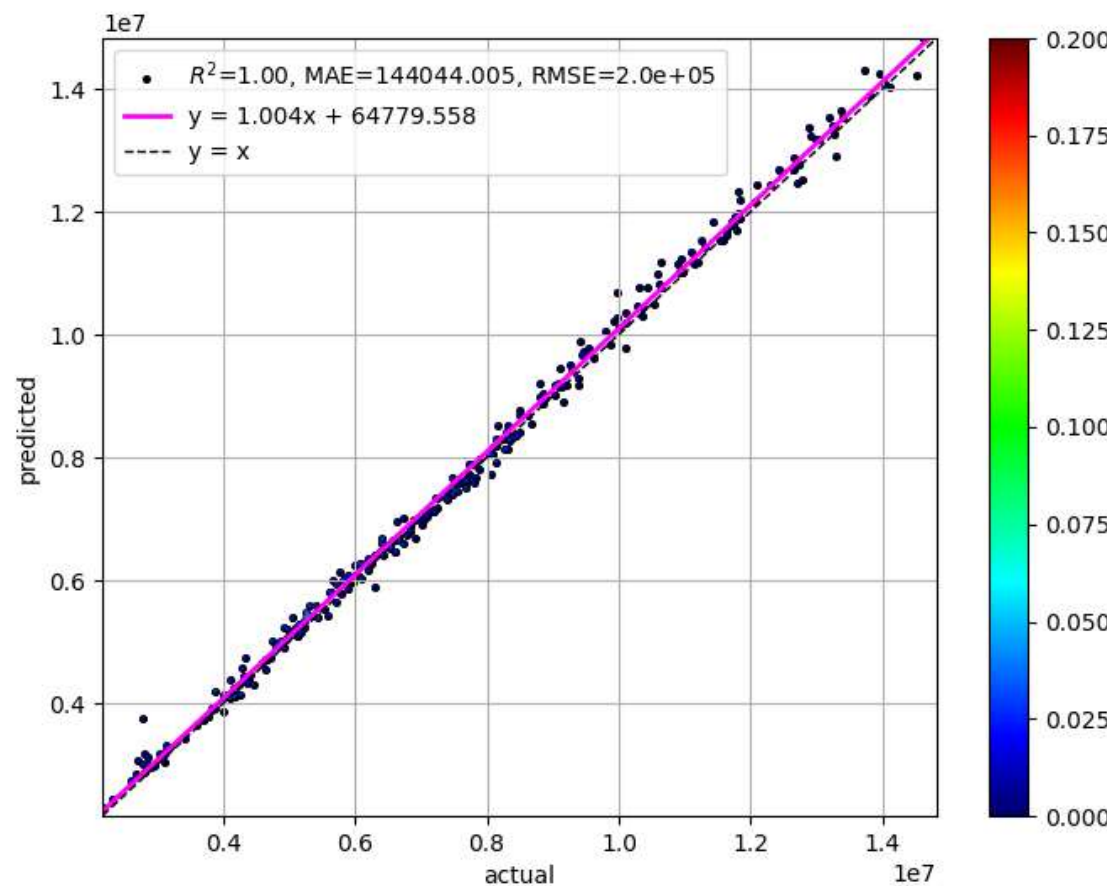
損失関数値の推移



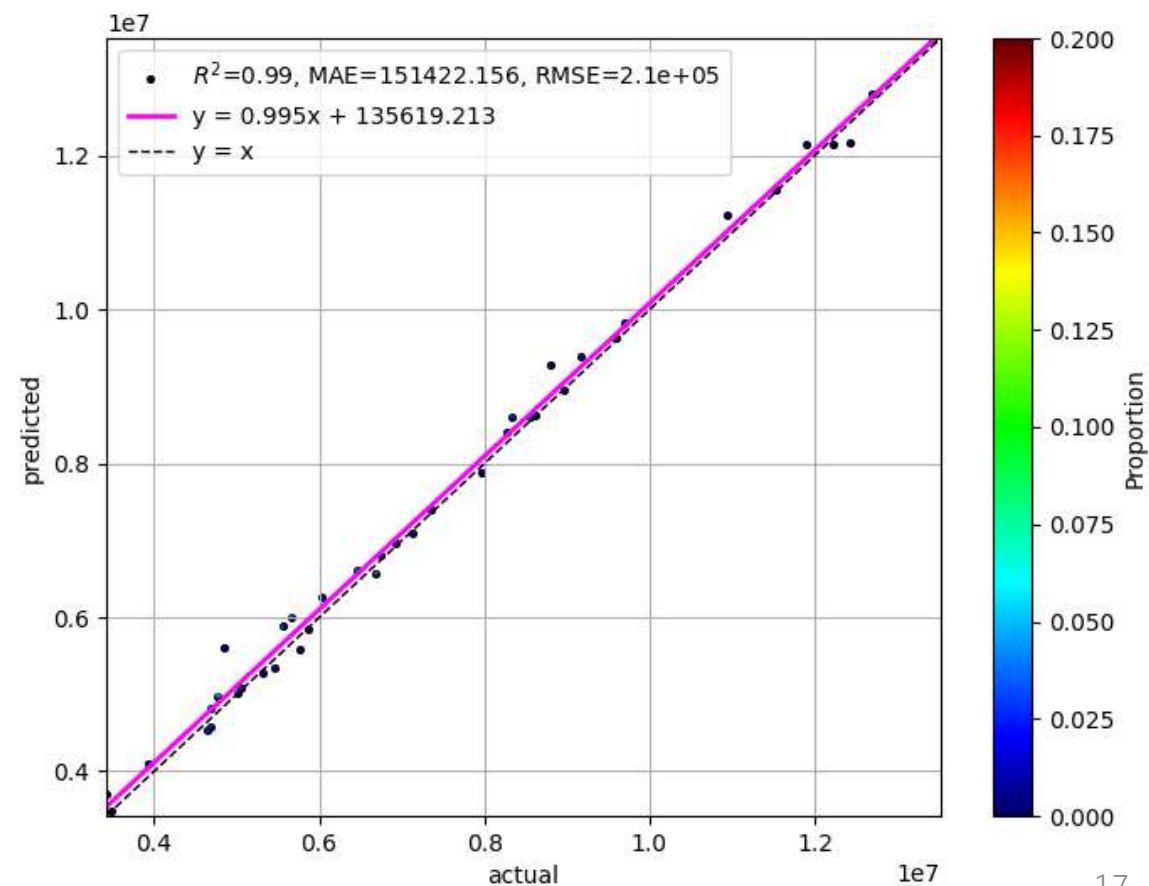
参照値、類推値の相関グラフ



Train set



Test set



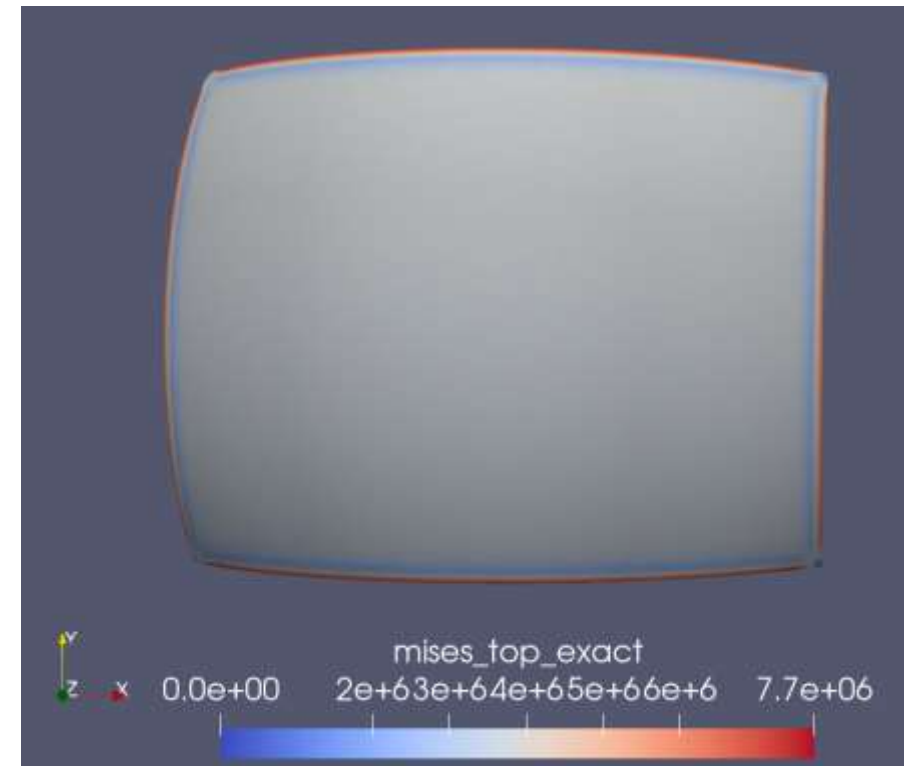
ミーゼス応力値の比較 (方形曲面板：上面)



類推値



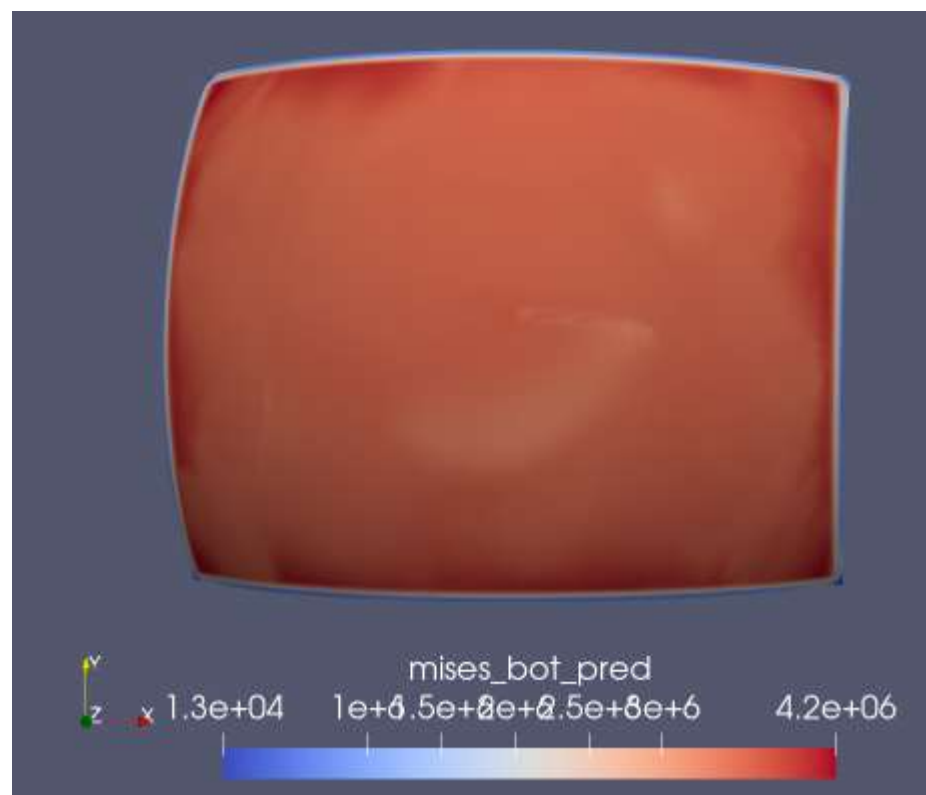
参照値



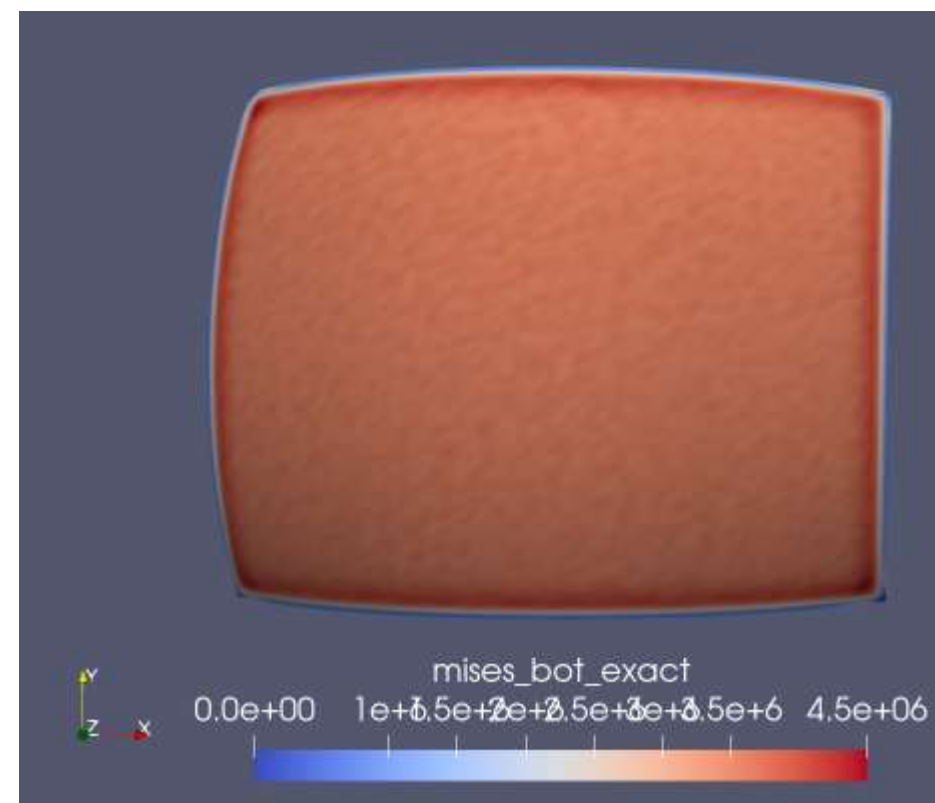
ミーゼス応力値の比較 (方形曲面板：下面)



類推値



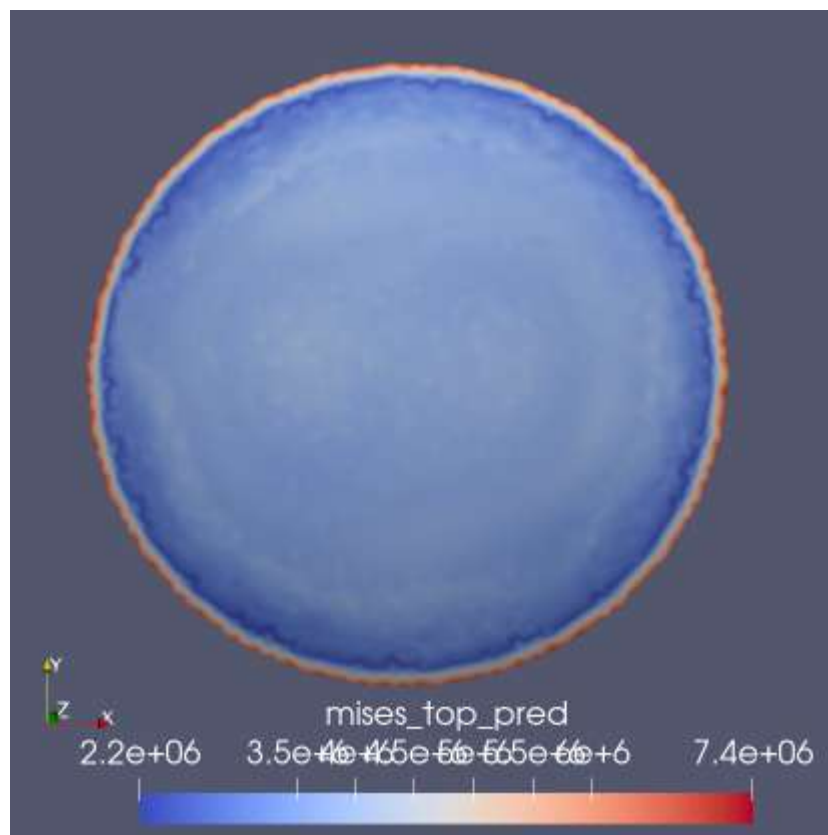
参照値



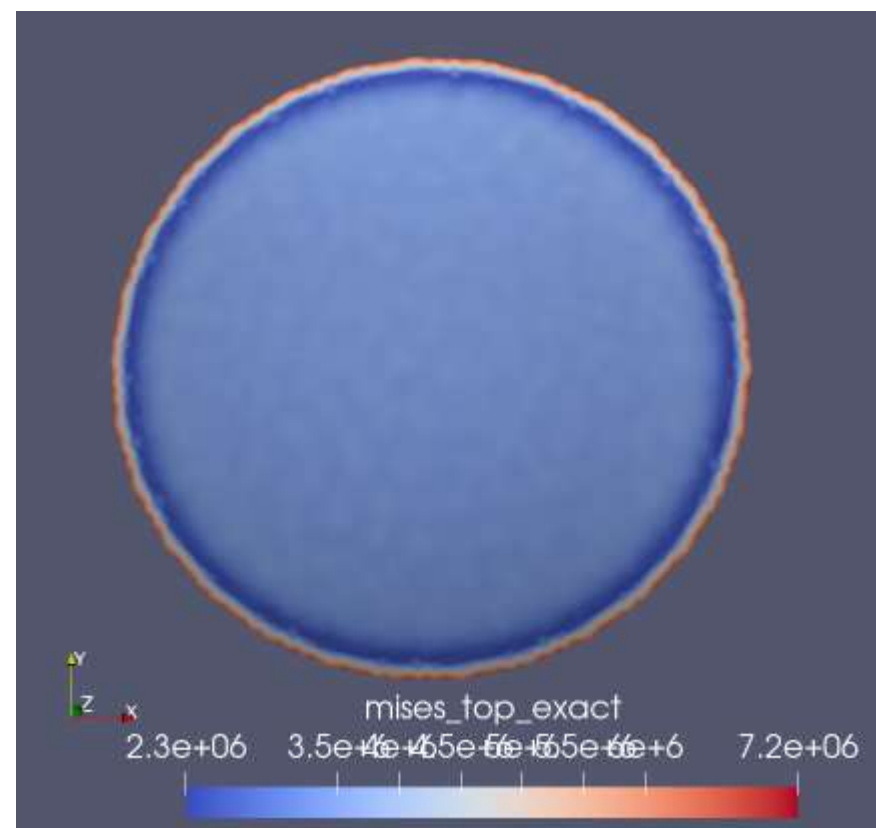
ミーゼス応力値の比較 (半球板：上面)



類推値



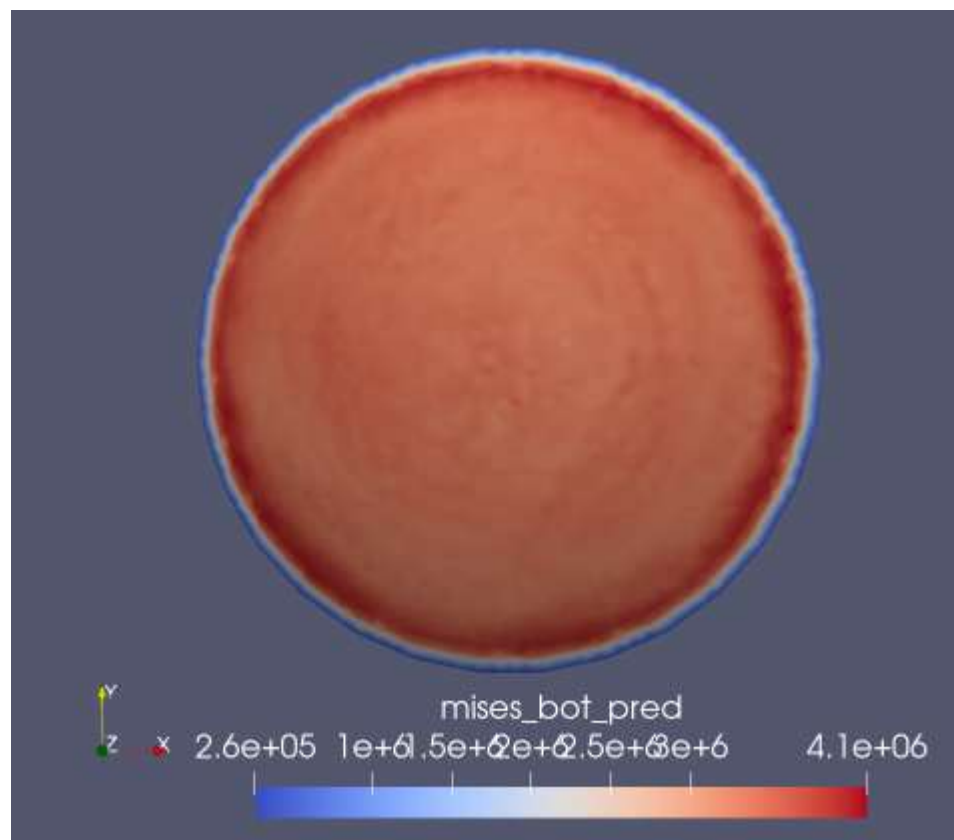
参照値



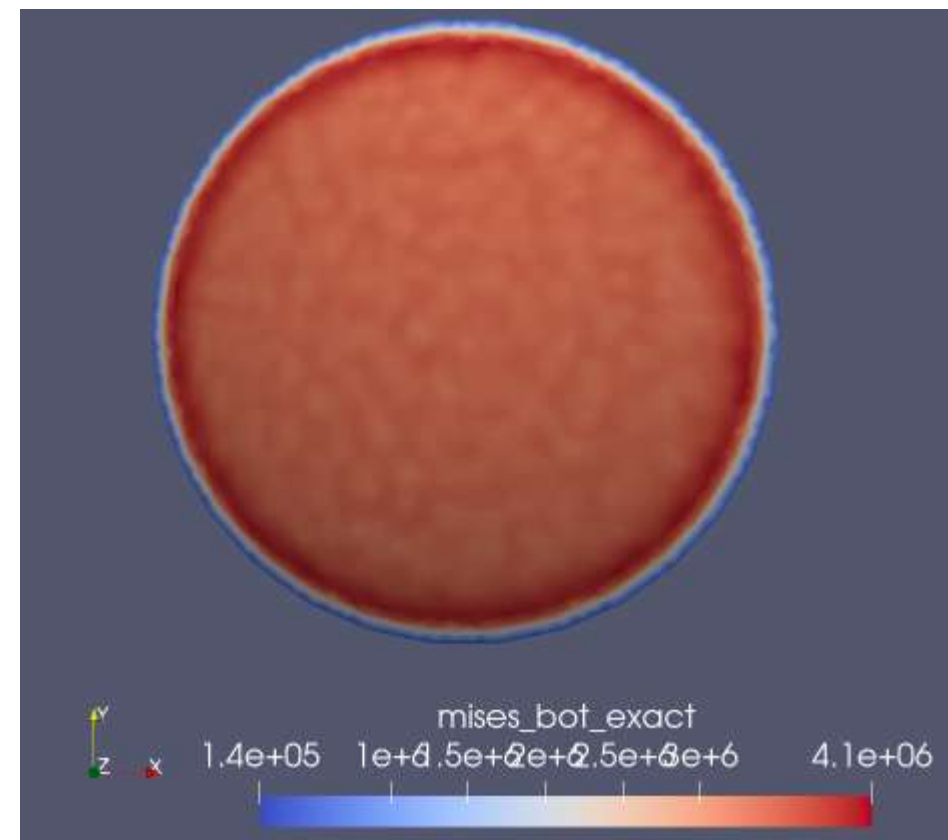
ミーゼス応力値の比較 (半球板：下面)



類推値



参照値

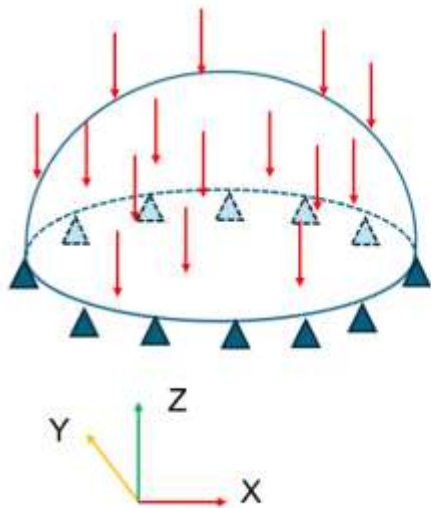


デモサイトURLと使用方法



- 本書で報告されたAIサロゲートモデルを弊社デモサイトで公開しました。以下のURLからアクセスしお試しください。
- <https://demo3.astraea-soft.com/shell.html>

PINNs UNIFORM PRESSURE IN ONE DIRECTION



$E = 10.92e11 \text{ N/m}^2$
 $\theta = 0.3$
Thickness = 2.54mm

The circular curve plate is created by applying a transformation:

$$z = \sqrt{2 * 1.8 * \text{radius} - x^2 - y^2}$$

Plate Shape

Circular curve plate

Location

Upper plane

Radius

0.5 ≤ Radius ≤ 2.5

Loading

3000 ≤ Loading ≤ 10000

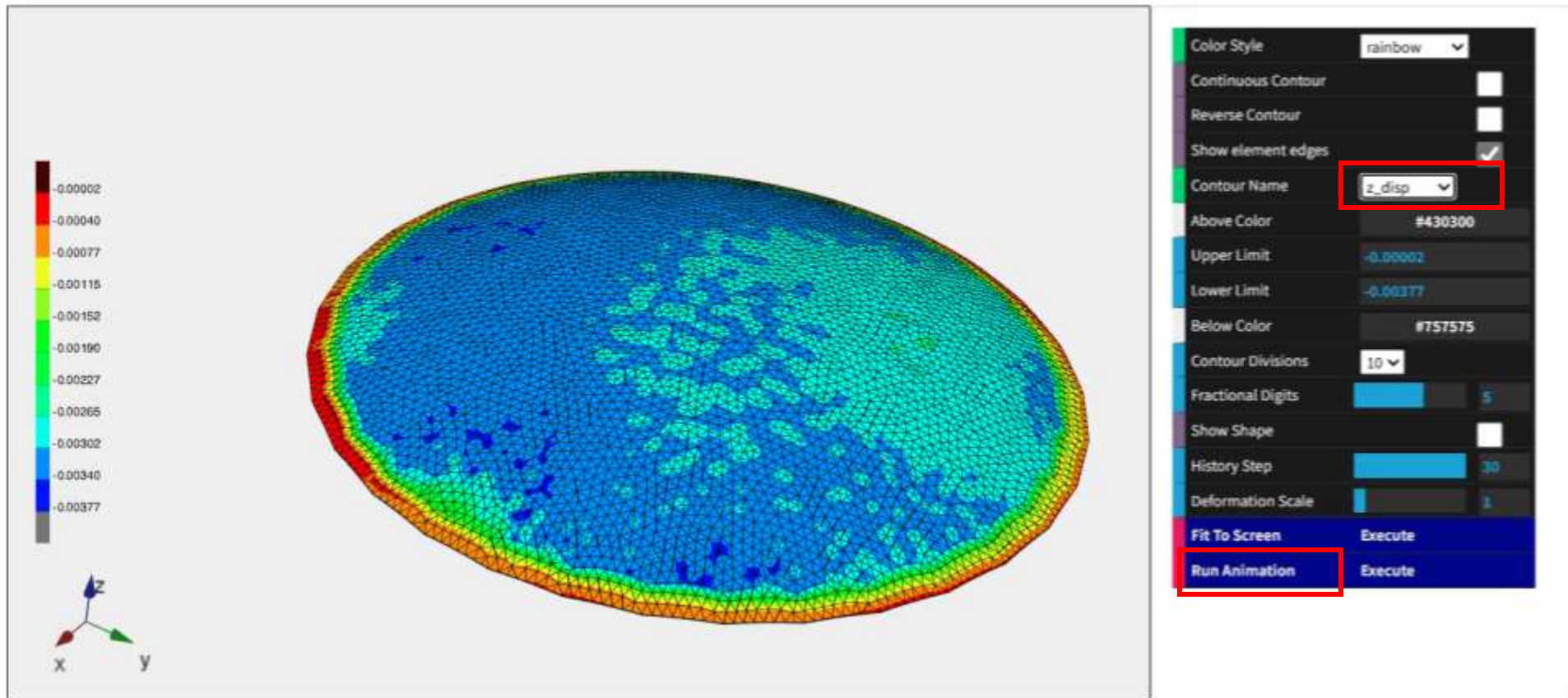
History steps

1 ≤ History steps

Execute

赤枠内のパラメータを適宜入力ください。
Executeボタンで類推が実行されます。

デモサイト結果表示方法



1. 赤枠から結果を選択します

2. Run Animation ボタンで結果アニメーションが表示されます。



以上