



PINNsを使用した パラメトリックモデル検証

独自PINNsサロゲートモデル報告（抜粋版）

株式会社アストライアーソフトウェア

2024年8月5日

概要

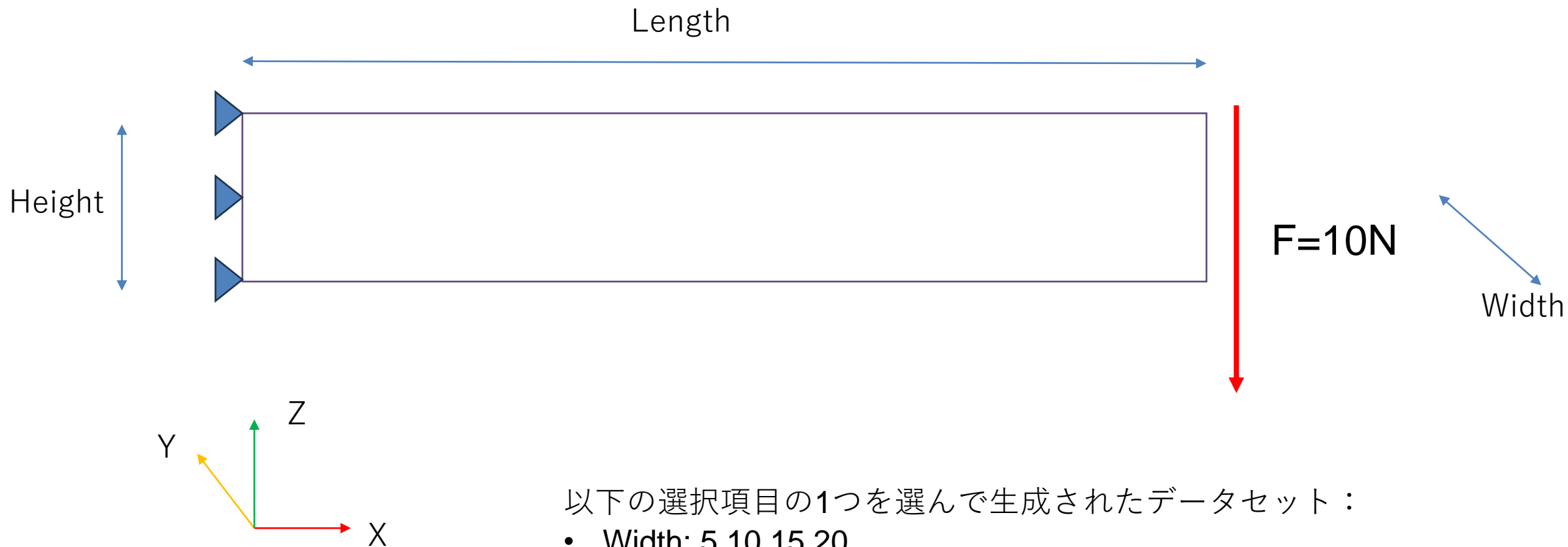


- 簡単な構造力学の静解析問題について、Physics-Informed Neural Networks(PINNs)を使ったAIによるサロゲートモデルを作成した。サロゲートモデルのストラクチャーは弊社独自のものを使用した。
- 今回は形状の寸法変更に関する追従性を検証するため、片持ち梁モデルに長さ、幅、高さを変化させた複数の形状をトレーニングデータとして用意した。トレーニングされたサロゲートモデルは、学習した範囲の形状変更に関し精度の良い類推結果が得られることを目論む。
- トレーニングはデータ参照を行うため、損失関数に物理式とデータ参照の両者を含める。
- トレーニングされたサロゲートモデルは、トレーニングされた形状以外の未知モデルに関しても、精度の良い類推結果が得られた。また、物理式を用いない場合と比較して、参照データ数、類推精度、トレーニング時間において優位であった。

トレーニングモデル

- トレーニングに使用した構造解析モデルは、片持ち梁の曲げモデルである。長さ、幅、高さをパラメーターとし、拘束条件、荷重条件、材料定数は固定した線形静解析モデル。（4ページ）
- FEM解析による参照データは、形状パラメータをそれぞれ変化させた形状を75個用意した。
- モデルの全節点についてデータ参照を行った。節点データは、内部節点、表面節点、拘束節点（後部）、荷重節点（前部）に分類され、それぞれ適切な処理が実施された。（5ページ）

トレーニングモデル

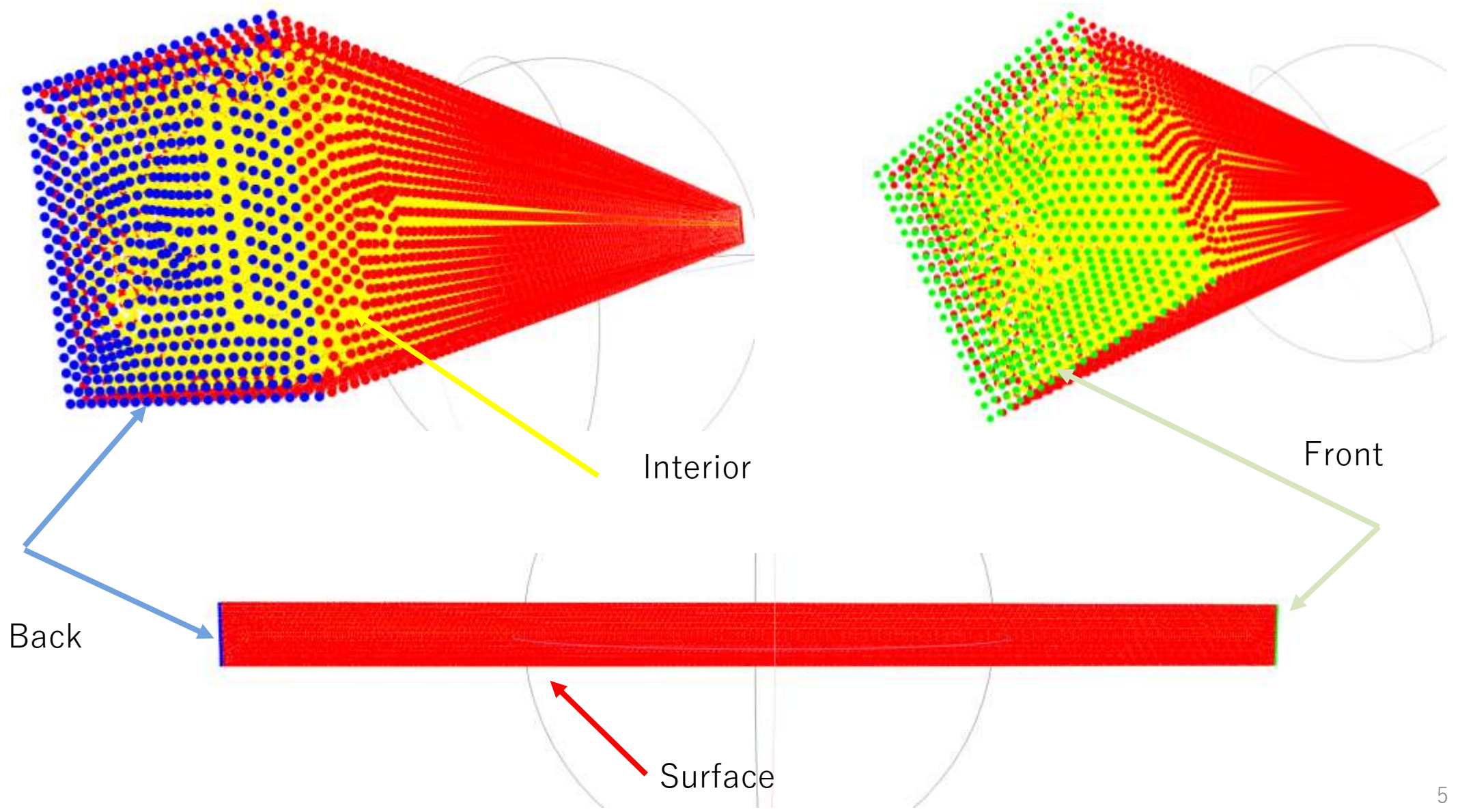


以下の選択項目の1つを選んで生成されたデータセット：

- Width: 5 10 15 20
- Height: 5 10 15 20
- Length: 60 90 120 145 160

トレーニングデータ: 75 (メッシュサイズ1.0mm, 2次)

節点のグルーピング

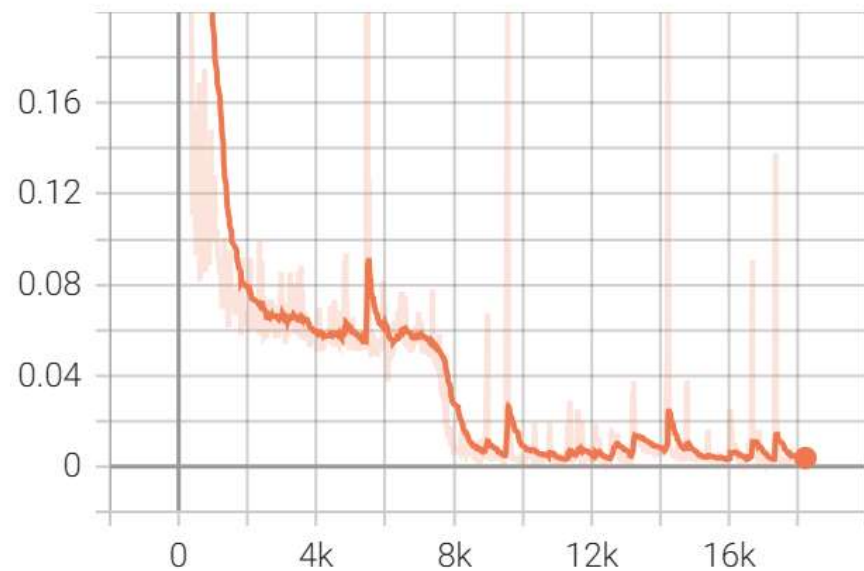


トレーニング

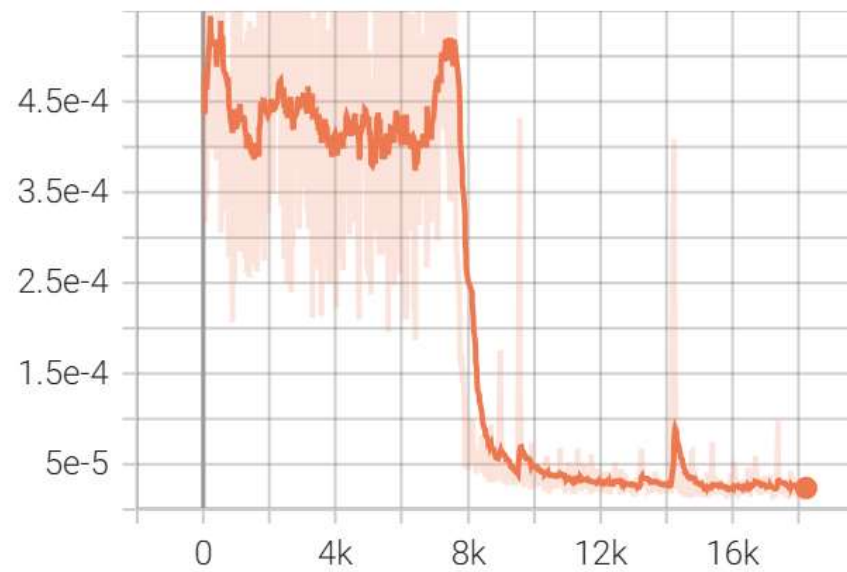
- トレーニング時の損失関数の推移を全体 (Train loss)、X変位 (u)、Y変位 (v)、Z変位 (w) のグラフで示した。(7ページ)
- 支配的な変位であるwは順調に収束し、その他のu、vについては振動しながらも追従し収束している。4000イタレーション時には、ほぼ収束しており、従来方法に比べて優れた収束性能を示した。

※イタレーション数 = バッチ数 (20) × エピック数
4000イタレーション = 200エピック

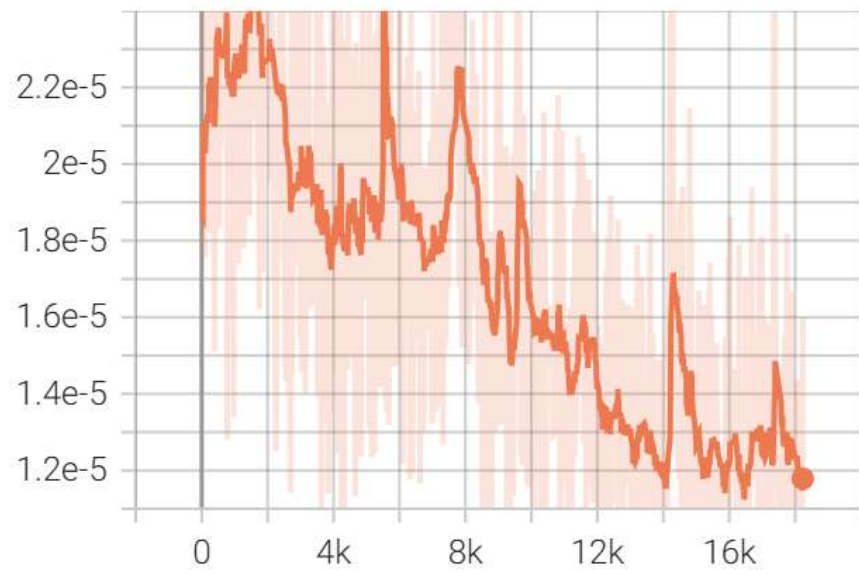
train_loss
tag: train_loss



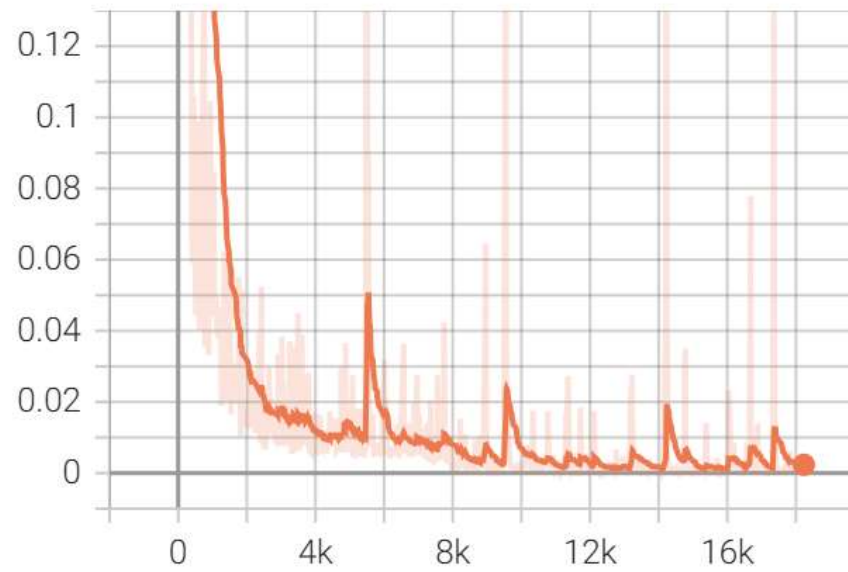
u
tag: u



v
tag: v



w
tag: w



類推結果（既知モデル）

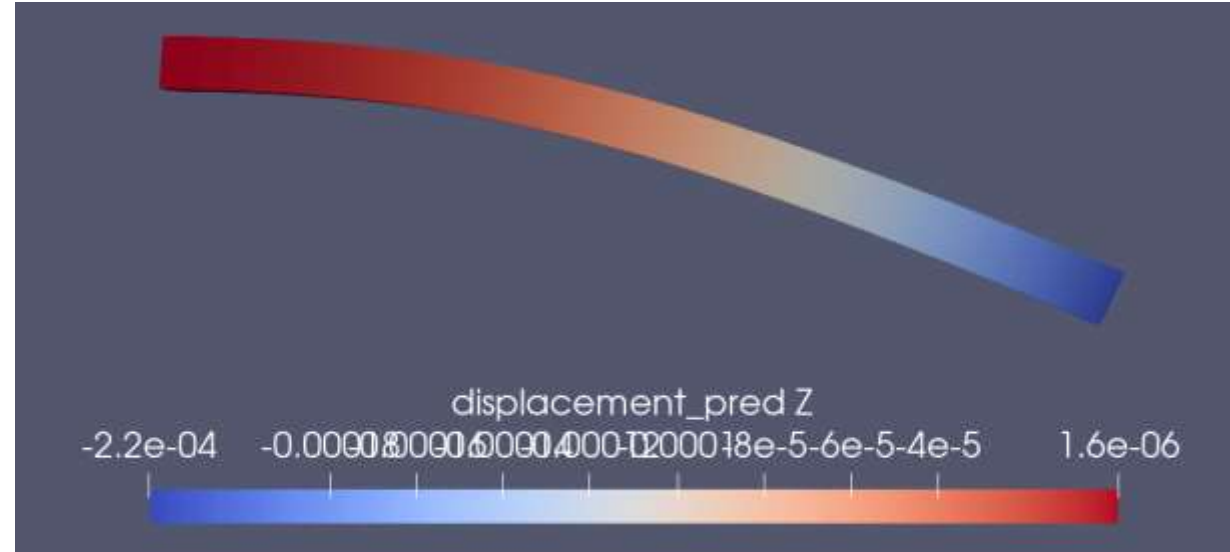
- トレーニングしたサロゲートモデルを使い、既知モデルであるトレーニングに使用した形状寸法における類推結果を検証した。
- 下表の4形状に関して、類推結果を比較した。右端（自由端）のW（Z方向変位）について、FEM結果（Actual）と優れた一致をしている。
- 結果の詳細については、Z方向変位コンター図を示した。（9ページ以降）

Width	Height	Length	Right end Predict w	Right end Actual w	Relative Error
5	5	90	-2.2e-4	-2.2e-4	0
10	5	120	-2.6e-4	-2.6e-4	0
15	15	145	-1.3e-5	-1.1e-5	0.181
20	10	160	-4.2e-5	-3.9e-5	0.077

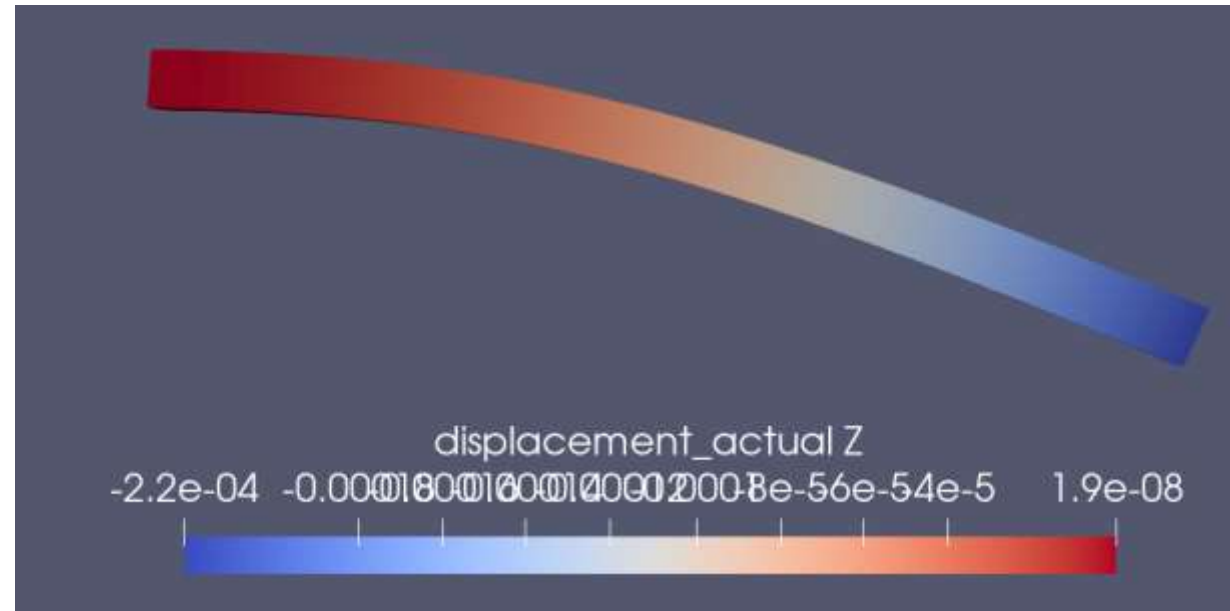
Displacement Z

width = 5
Height = 5
Length = 90

Predict



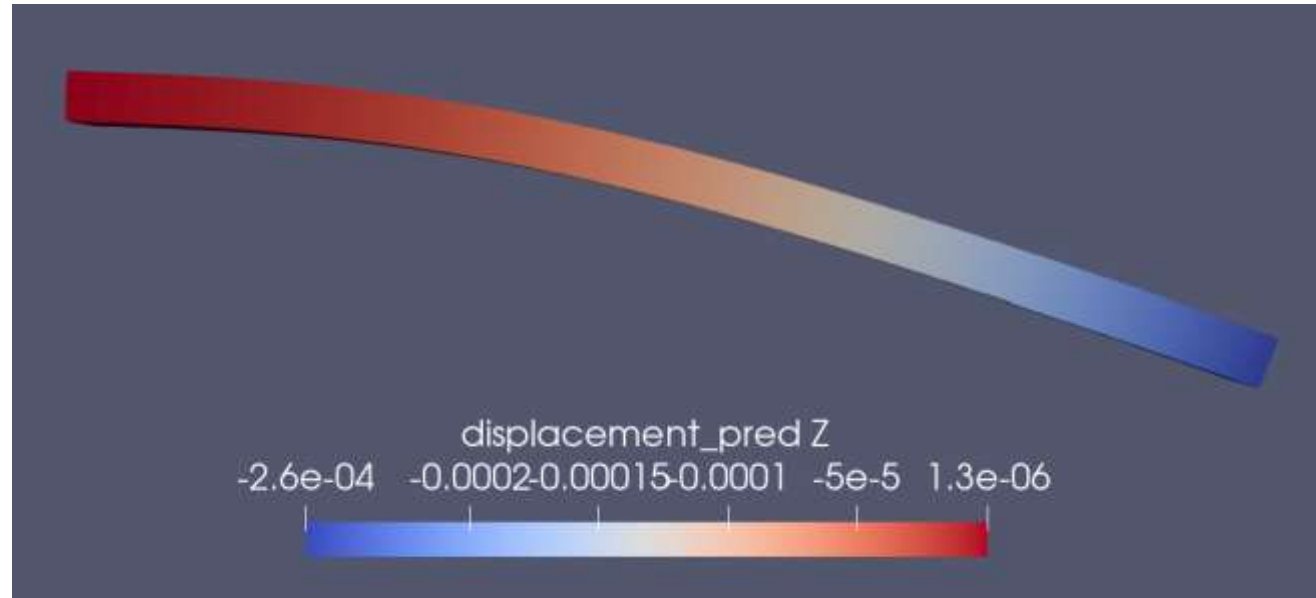
Actual



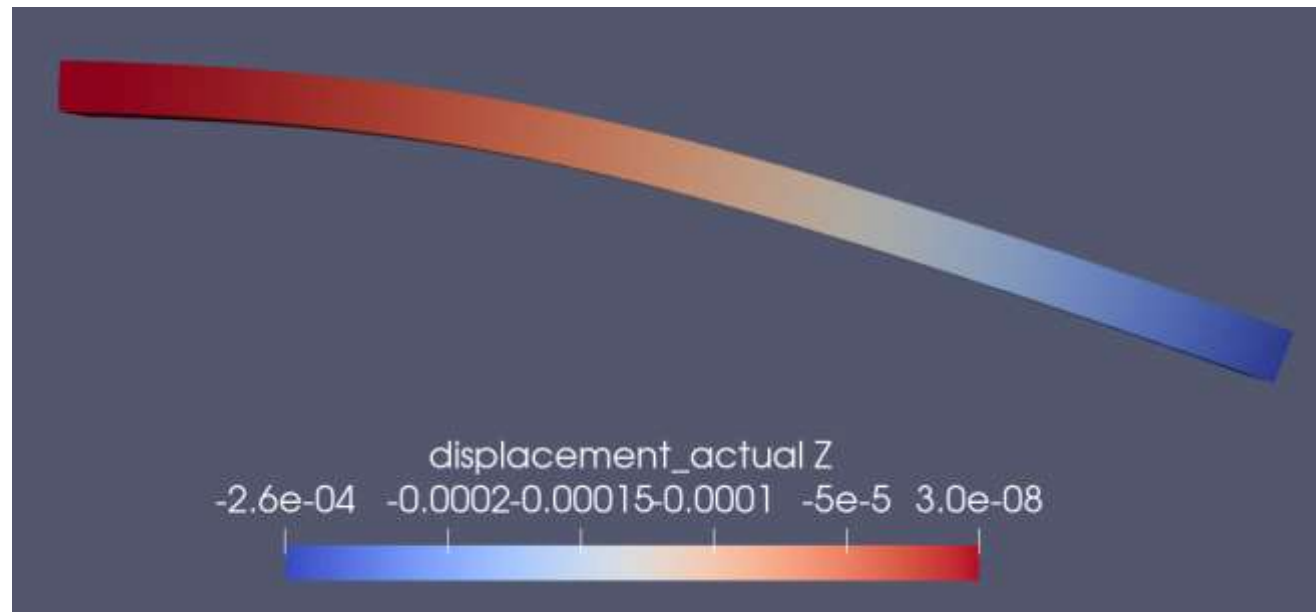
Displacement Z

width = 10
Height = 5
Length = 120

Predict



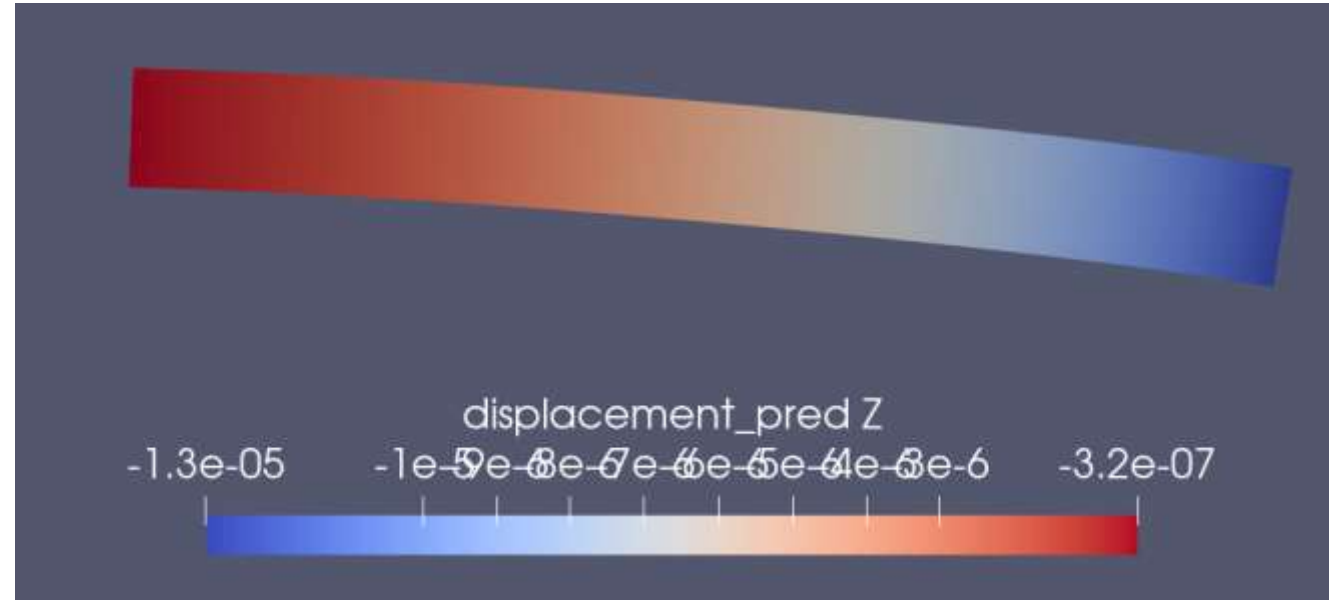
Actual



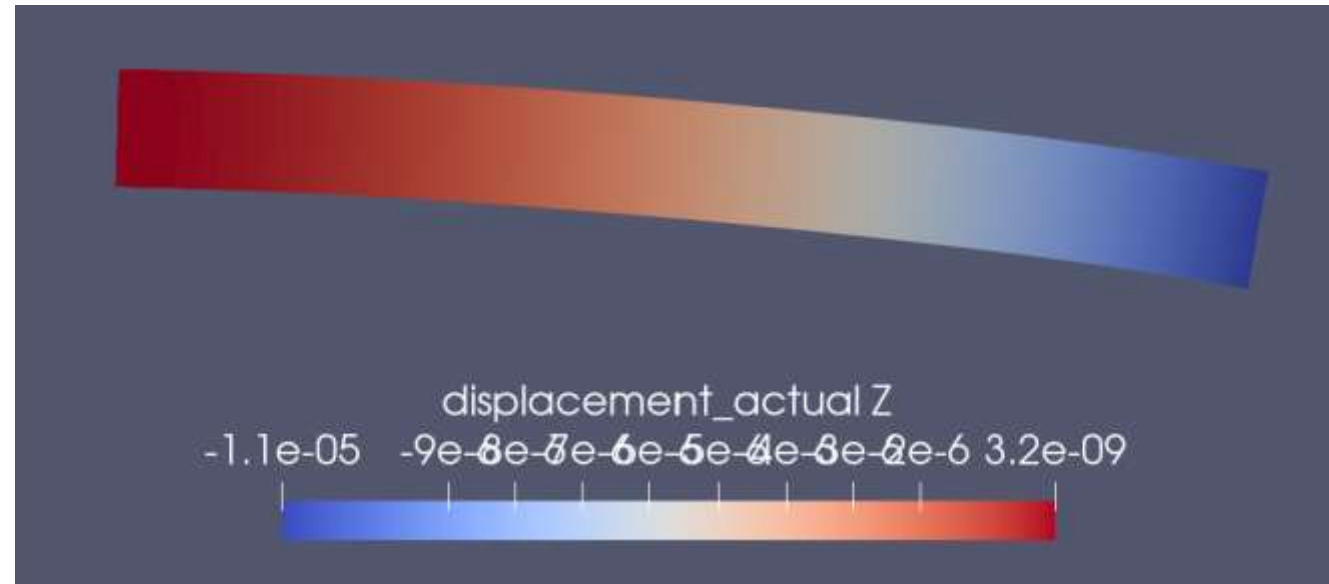
Displacement Z

width = 15
Height = 15
Length = 145

Predict



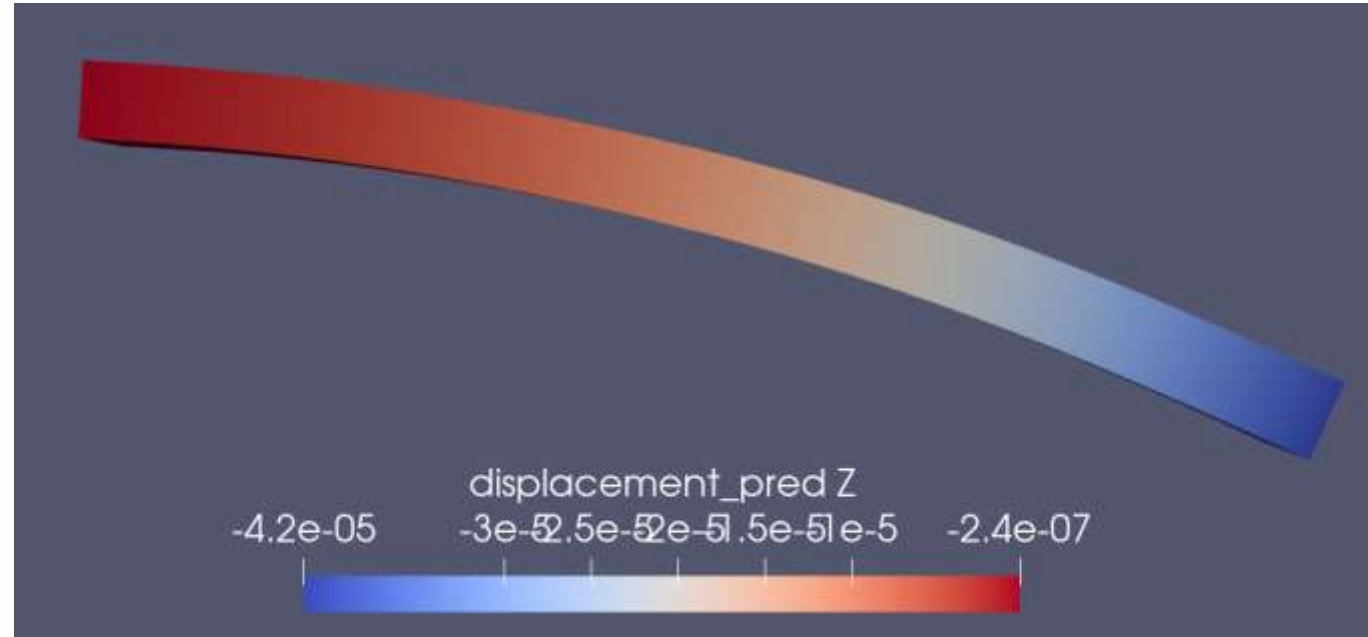
Actual



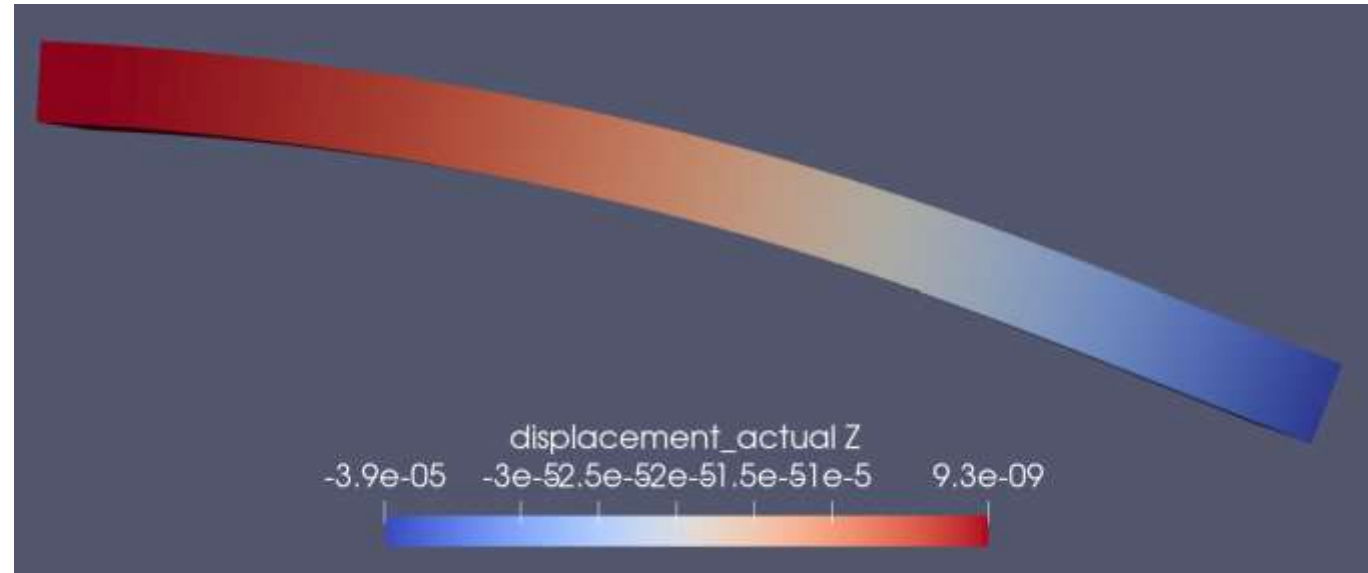
Displacement Z

width = 20
Height = 10
Length = 160

Predict



Actual



類推結果（未知モデル）

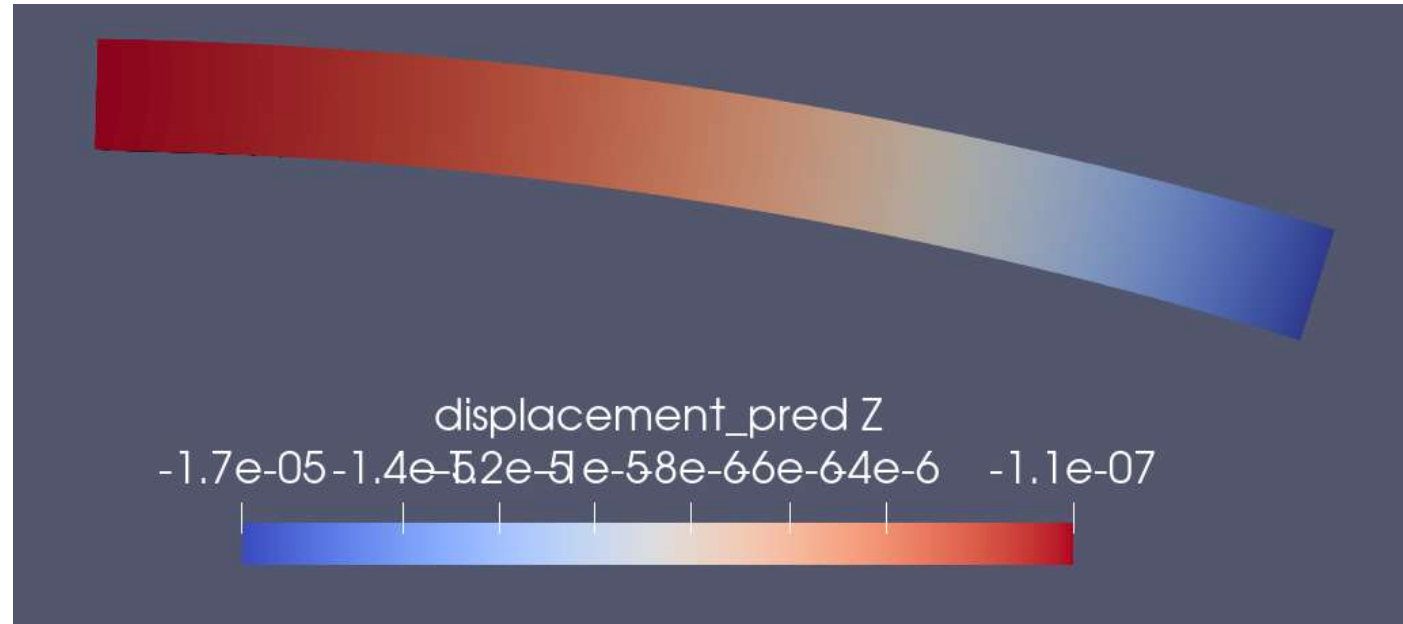
- また、同じサロゲートモデルを使い、トレーニングに使用していない未知の形状寸法における類推結果を検証した。
- 下表の2形状に関して、類推結果を比較した。赤字は未知寸法を示す。
- 右端（自由端）のW（Z方向変位）について、FEM結果（Actual）と優れた一致をしている。
- 結果の詳細については、既知モデルと同じ内容を示した。（14ページ以降）

Width	Height	Length	Right end Predict w	Right end Actual w	Relative Error
15	10	110	-1.7e-5	-1.7e-5	0
13	11	100	-1.2e-5	-1.1e-5	0.09

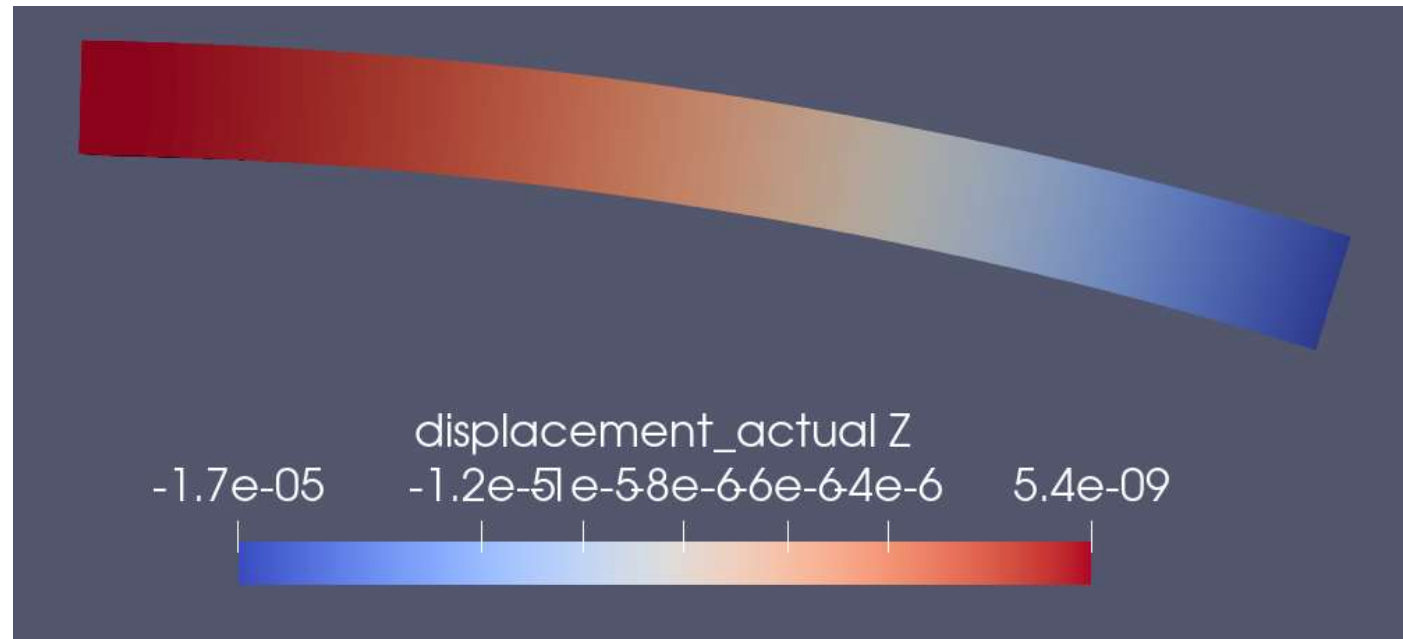
Displacement Z

width = 15
Height = 10
Length = 110

Predict



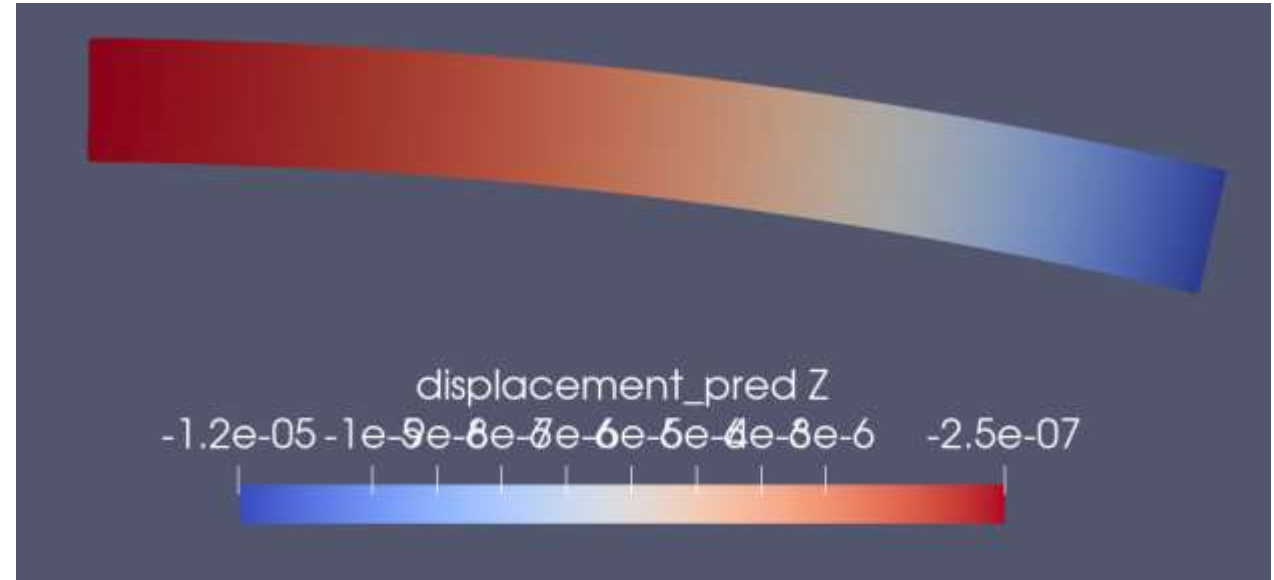
Actual



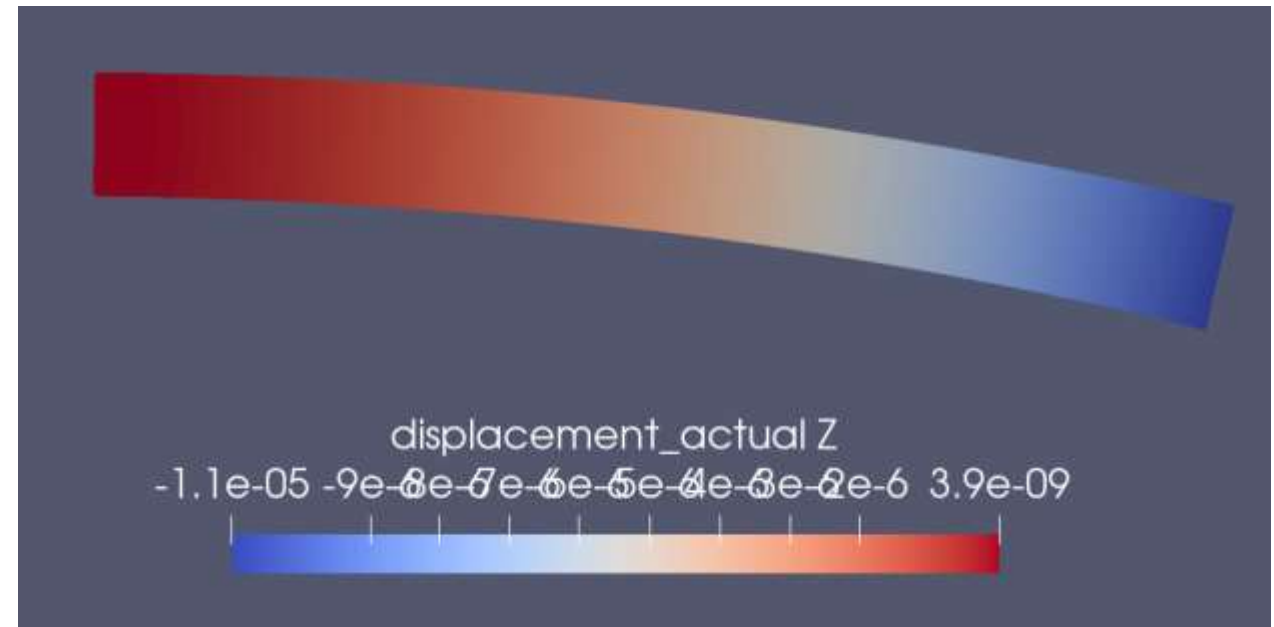
Displacement Z

width = 13
Height = 11
Length = 100

Predict



Actual

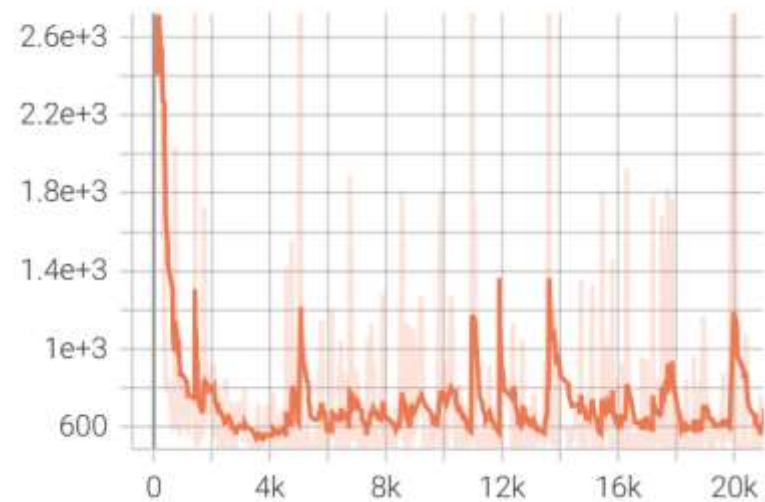


フォンミーゼス応力の類推機能追加

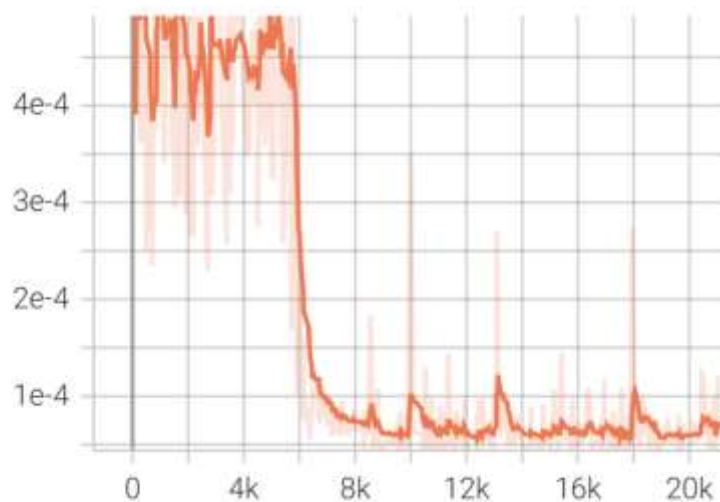


- 前回の変位を類推するNNに加えて、フォンミーゼス応力を類推するNNを追加した。
- 物理式による損失関数は、変位とフォンミーゼス応力の両者を参照する。
- トレーニング時の損失関数の推移を全体 (Train loss)、X変位 (u)、Y変位 (v)、Z変位 (w)、フォンミーゼス応力 (mises) のグラフで示した。(17ページ)
- 前回と同様に支配的な変位であるwとmisesは順調に収束し、その他のu、vについては振動しながらも追従し収束している。

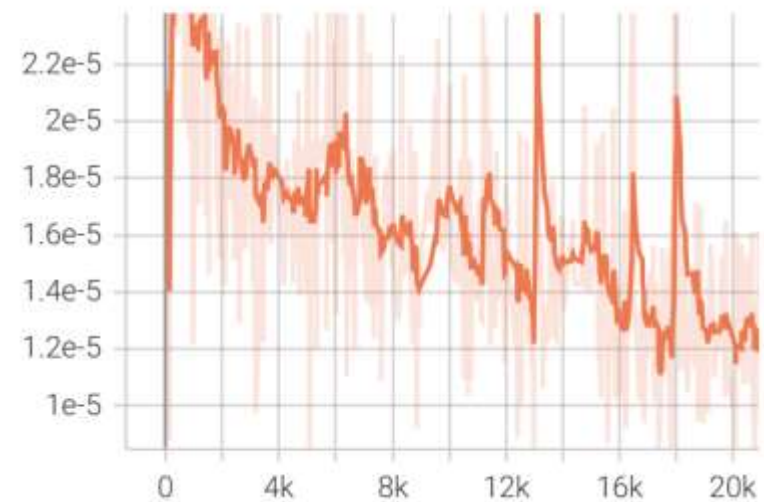
train_loss
tag: train_loss



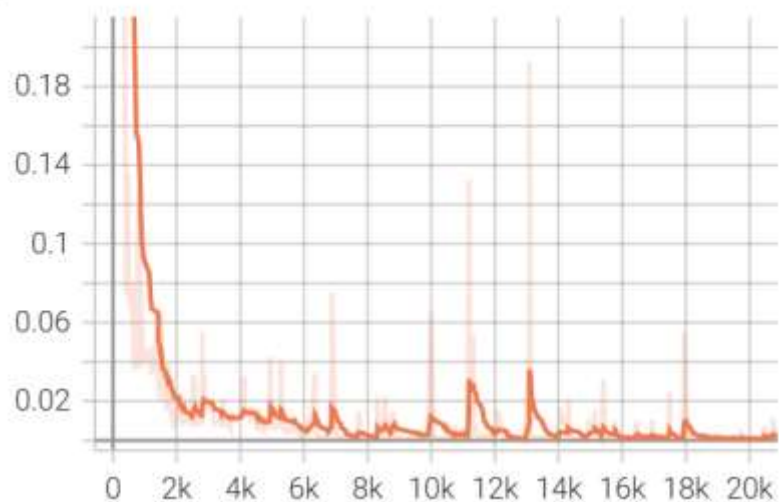
u
tag: u



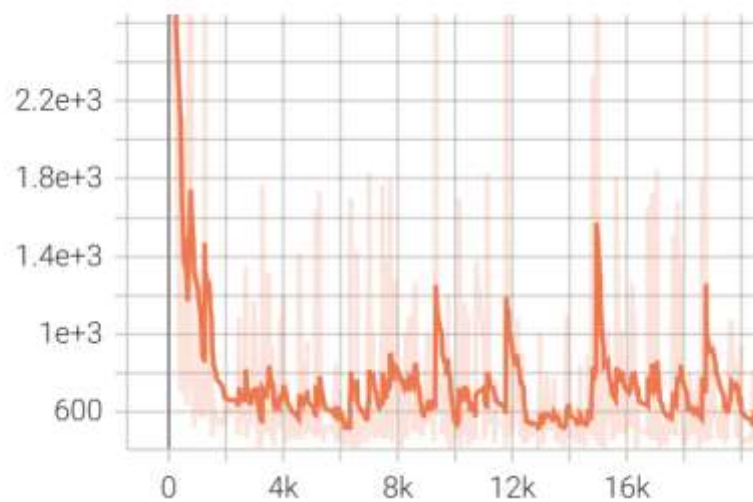
v
tag: v



w
tag: w



mises
tag: mises



類推結果



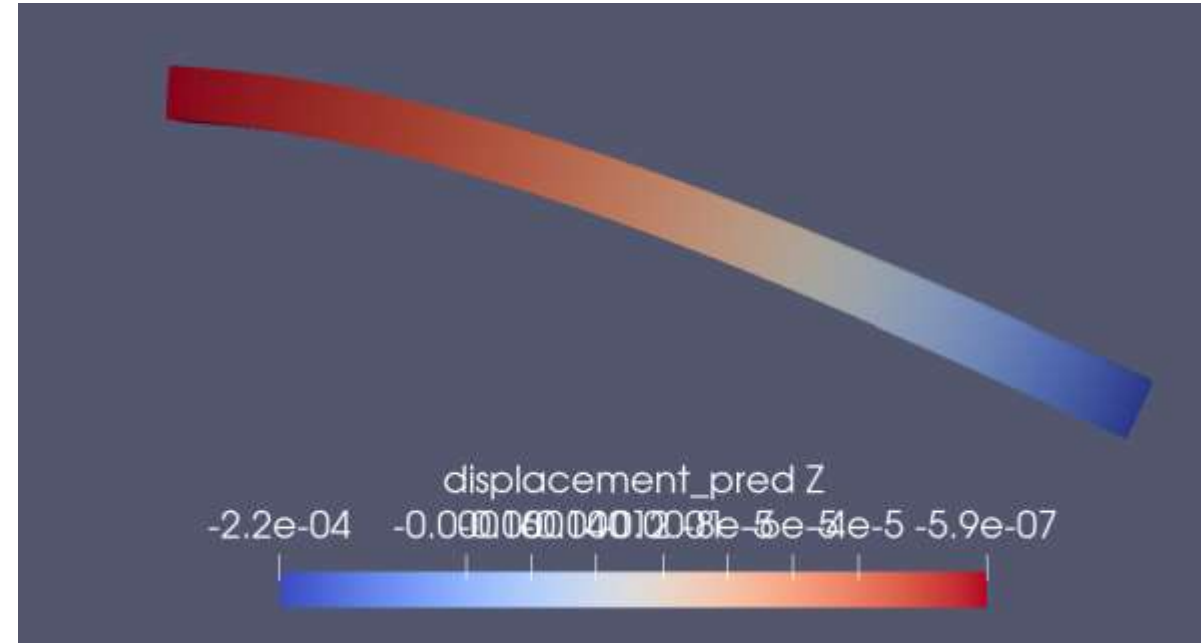
- トレーニングしたサロゲートモデルを使い、同様に既知モデルと未知モデルそれぞれ1ケースにおける類推結果を検証した。
- 下表に類推結果を比較した。両者とも左端（拘束端）のフォンミーゼス応力について、FEM結果（Actual）と優れた一致をしている。
- 結果の詳細については、X方向変位コンター図、Z方向変位コンター図、変形図比較、エラー分布コンター図、フォンミーゼス応力コンター図を示した。（19ページ以降）

Geometry	Width	Height	Length	Right end Predict w	Right end Actual w	Relative Error w	Max Predict mises	Max Actual mises	Relative Error mises
既知形状	5	5	90	-2.2e-4	-2.2e-4	0	4.4e7	4.6e7	0.04
未知形状	13	11	100	-1.2e-5	-1.1e-5	0.09	4.4e6	4.3e6	0.02

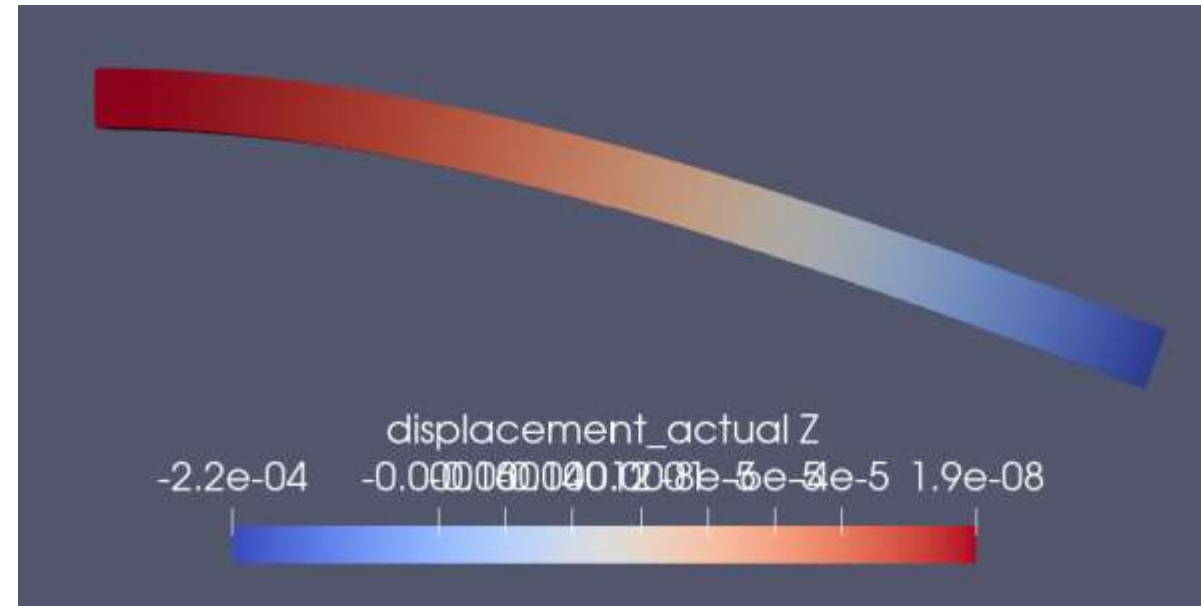
Displacement Z

width = 5
Height = 5
Length = 90

Predict



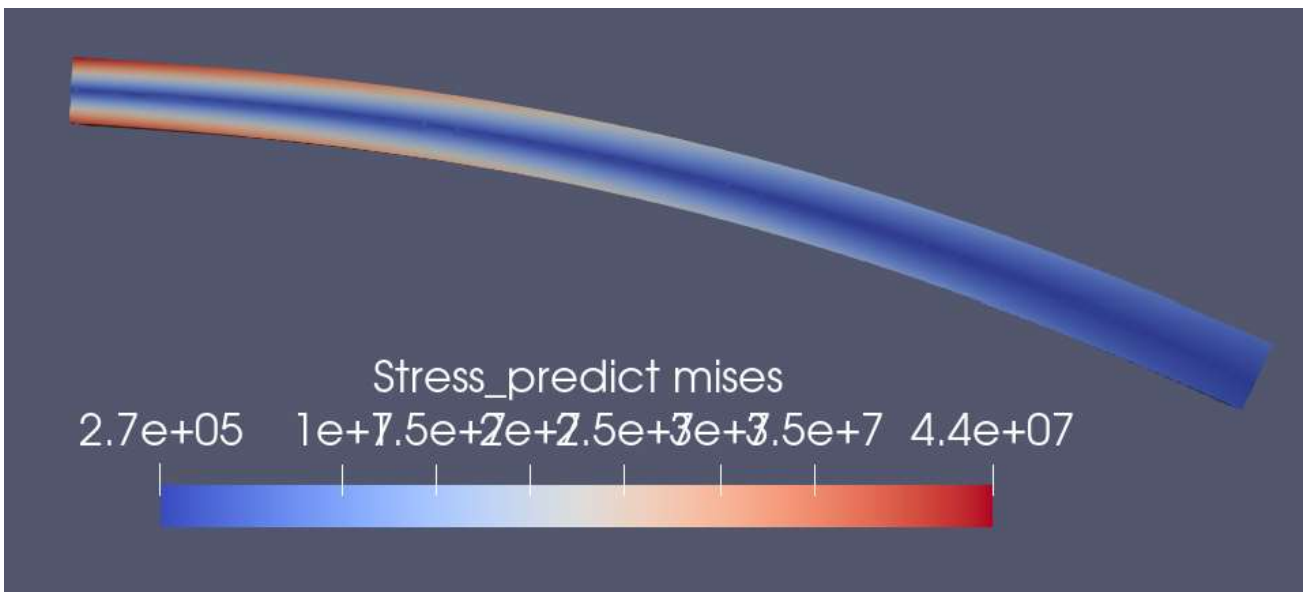
Actual



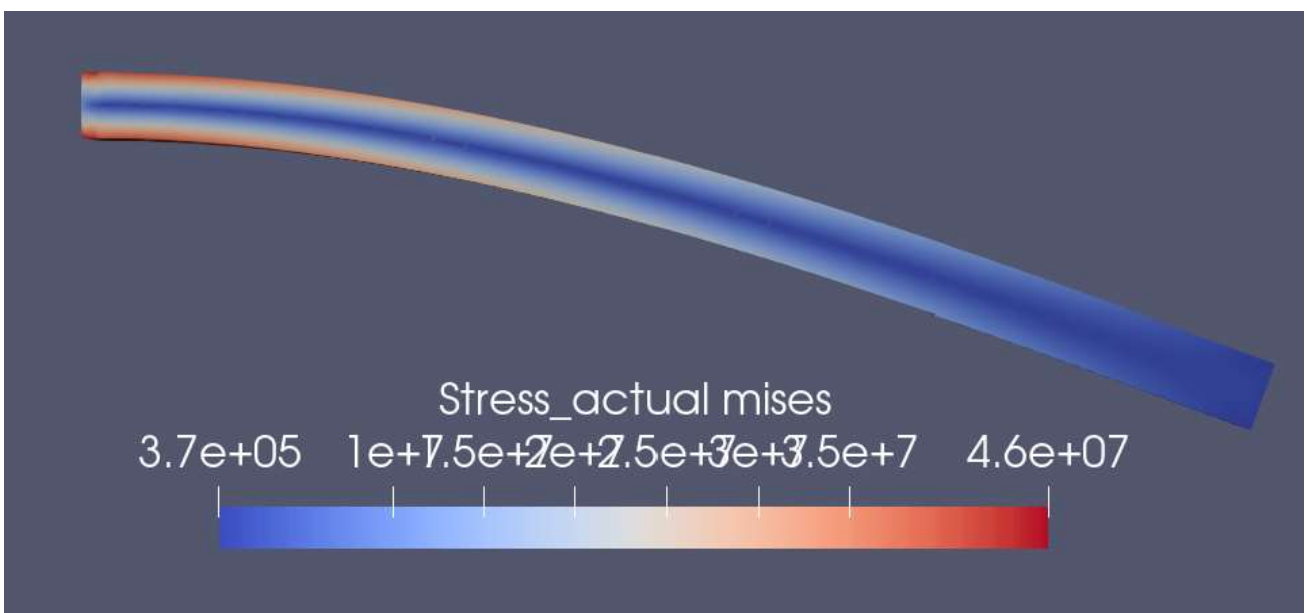
Stress Von Mises

width = 5
Height = 5
Length = 90

Predict



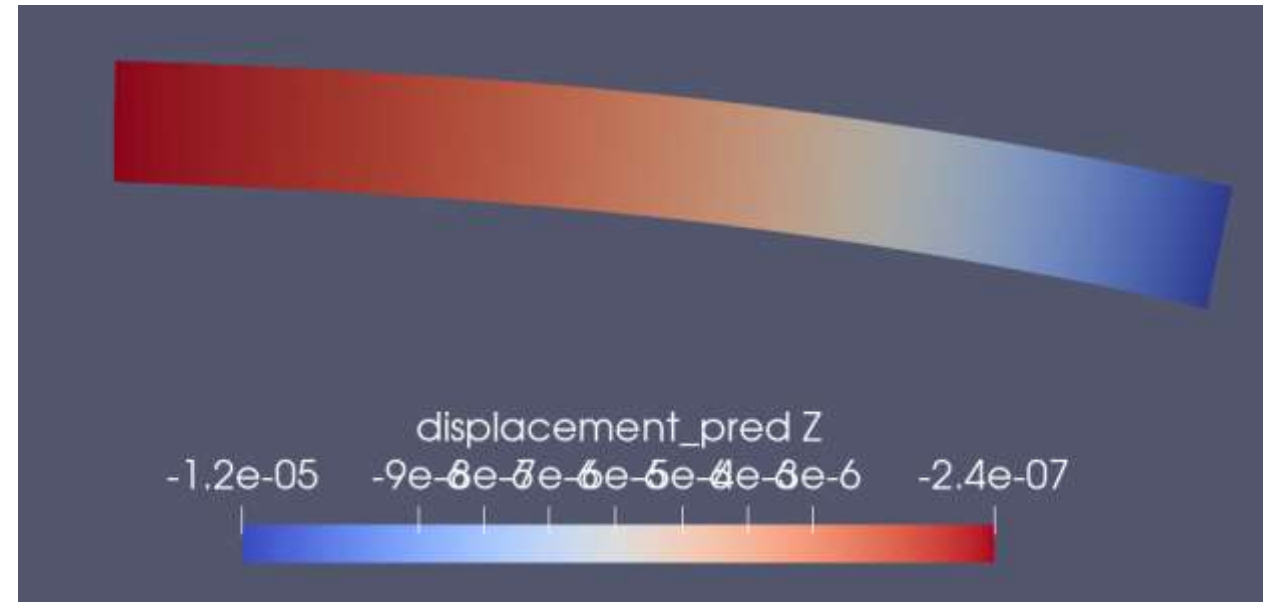
Actual



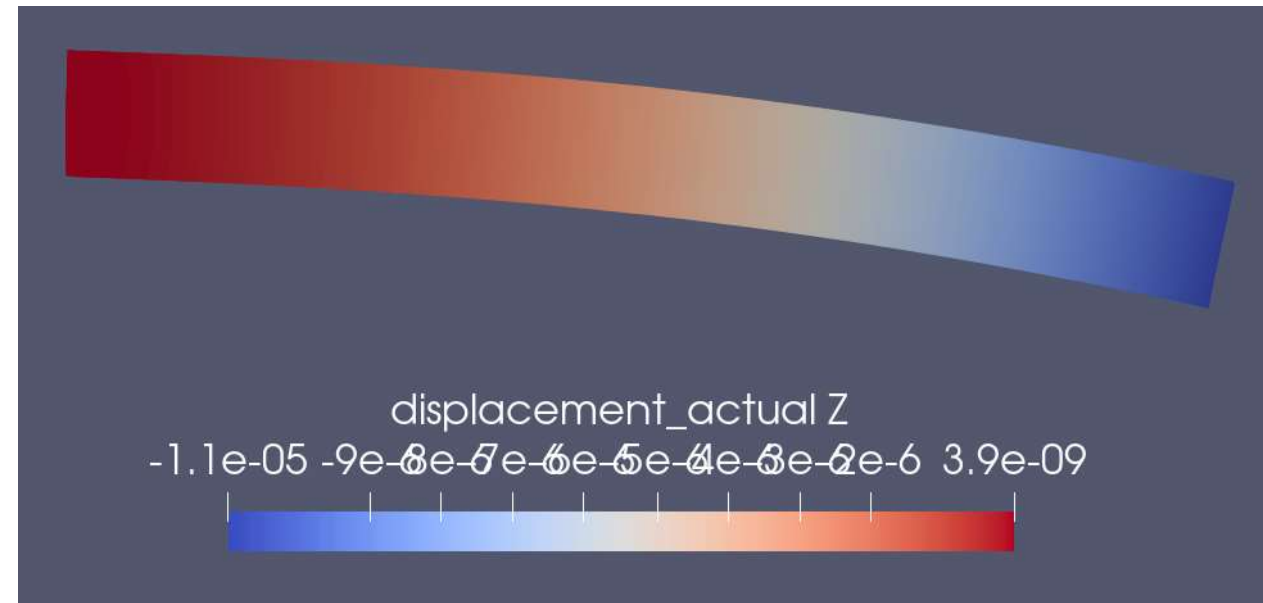
Displacement Z

width = 13
Height = 11
Length = 100

Predict



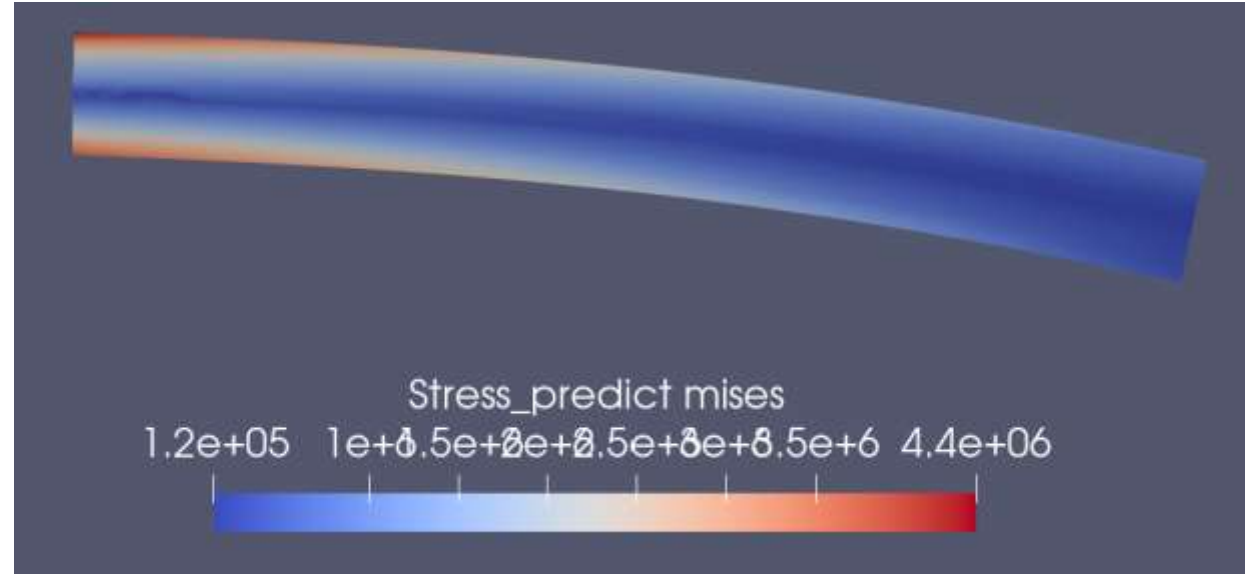
Actual



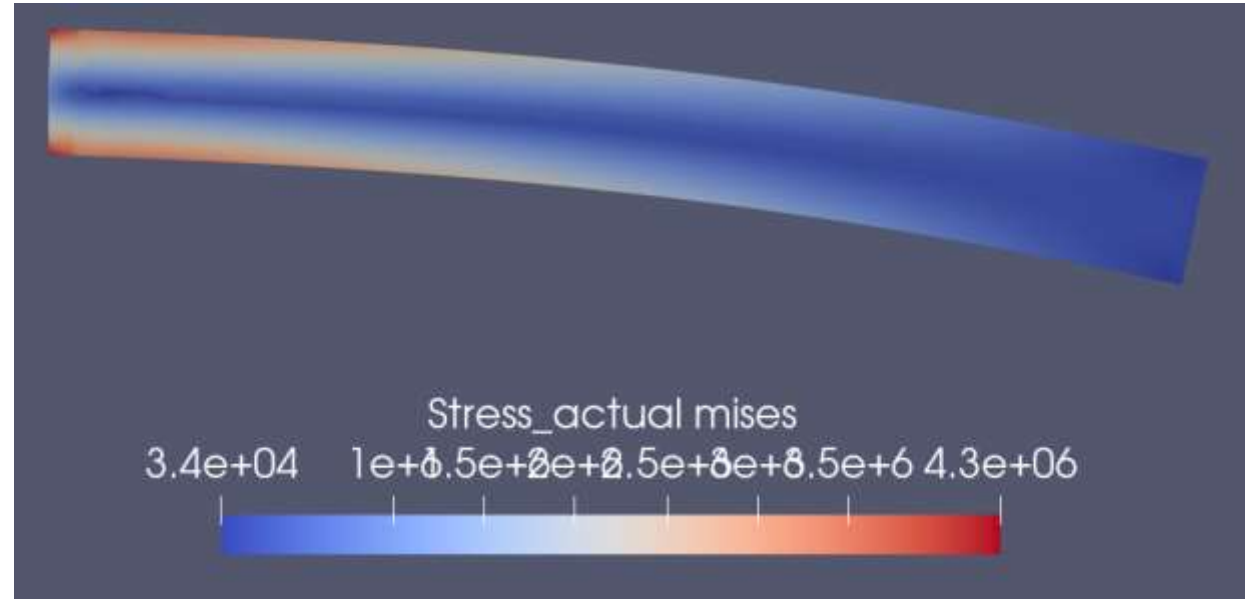
Stress Von Mises

width = 13
Height = 11
Length = 100

Predict



Actual



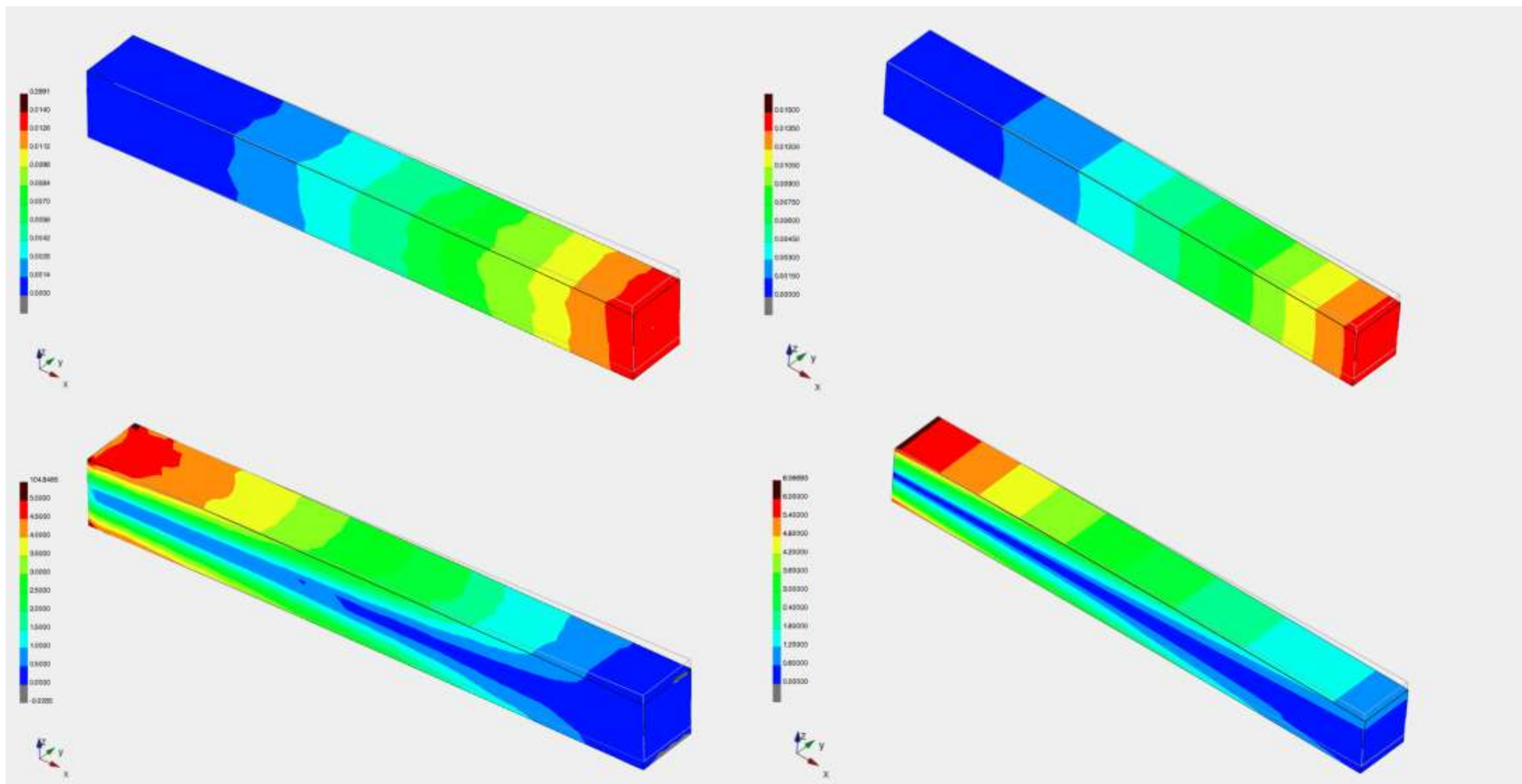
PINNs類推結果の優位性について



- 片持ち梁曲げ解析のサロゲートモデルは、以前にも実施され、最大変位や最大応力値の良好な一致を得ている。
- そのモデルはPINNsを用いず、FEM解析結果のみでトレーニングを実施した。次ページにその変位、応力の分布状況を今回のPINNs類推結果と比較した。
- PINNsの変位・応力分布はFEM解析結果と同様に梁の長手方向に均等に分布しており、より梁理論に即した結果となっている。これはPINNsの損失関数に物理式を含めた効果と言える。
- 今回使用された物理式は、平衡方程式、表面力境界条件、フック則であり、これらの拘束が変位・応力の滑らかな連続性に貢献したと考えられる。

PINNsを使用しない類推結果

PINNsを使用した類推結果



※両者の解析条件は若干異なります。

結論



- 弊社独自のストラクチャーを用いたPINNsサロゲートモデルを検証したところ、片持ち梁モデルにおいて、FEM解析解と良好な一致を得られた。
- このサロゲートモデルの参照データ数は75個であり、形状汎用モデルを作成するには不十分な数であるが、未知モデルにおいても既知モデルと同等の良解を得られており、今回の検証範囲内で形状汎用性も得られている。
- トレーニングの収束性能も従来の手法より向上しており、またPINNs類推結果も変位・応力分布において優位性が確認された。



以上