



PINNs+GCNを使用した パラメトリックモデル検証

株式会社アストライアソフトウェア

2024年10月22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。AIモデルのストラクチャーはGraph Convolutional Network(GCN)を使用した。
- **単純なパラメータで表現不可能な実部品形状をサロゲートモデルの対象とすることを目論見、メッシュモデル形状をそのまま入力データとするGCNを用いる。** よって梁形状を規定する高さ、幅などのパラメータは入力データとして用いず、ただメッシュモデルを作成するのみに使用される。
- トレーニングはデータ参照も行うため、損失関数に物理式とデータ参照の両者を含める。
- 変位と応力を類推するAIモデルを作成しその性能を評価した。良好な性能を得ることができた。

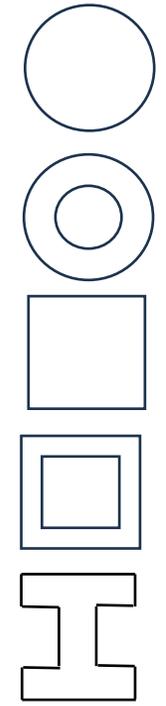
トレーニングモデル

- 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のために、5つの断面形状ごとに65個、合計325個の入カメッシュ形状を用意した。メッシュサイズは一定。これらのFEM解析を実施し、結果を参照データとした。
- 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、表面、後部（拘束点）、前部（荷重点）に分類された。(5ページ)

対象モデル 片持ち梁モデル（断面形状5種類）

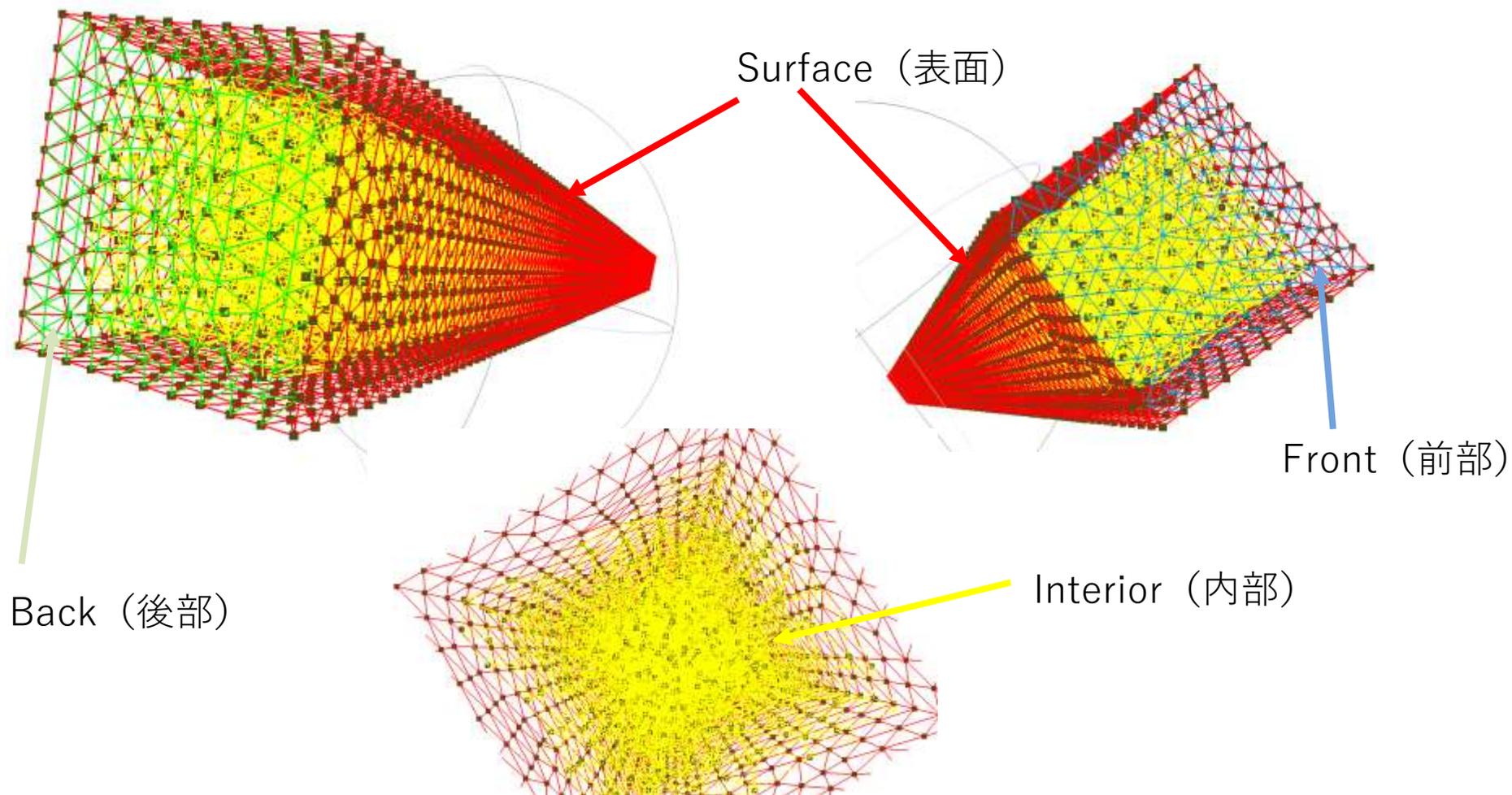


F=100N



- トレーニングデータ:
- 5断面に各65個のデータ
 - 合計325個のデータ

メッシュノードのグループ化 前部、後部、表面、内部の4グループ





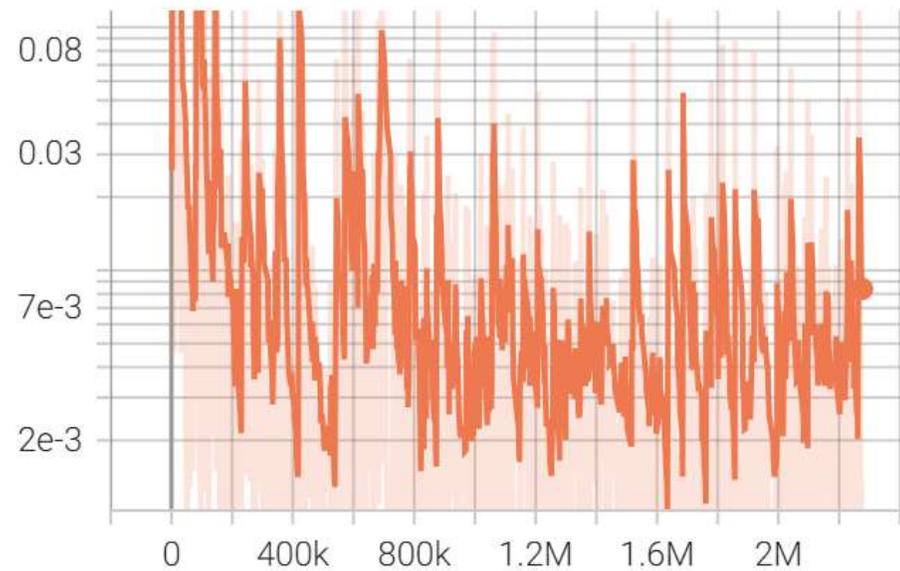
変位類推AIモデル

トレーニング

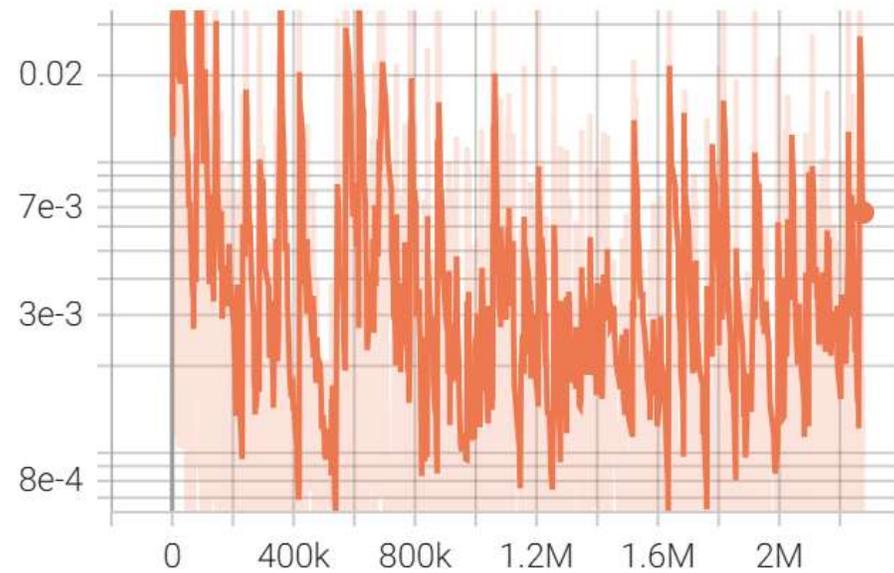
- トレーニング時の損失関数の推移を全体損失 (Train loss)、X変位 (u)、Z変位 (w) のグラフで示した。また、プロットを各エポックごとに平均化した (※) 全体損失を右下に示した (9ページ)
- グラフのX軸はイタレーション数であり、すべてのイタレーションの値を用いるとグラフが振動して見えるが、各エポックごとに平均化したグラフ (右下) は順調に収束している。
- また、X変位、Z変位のR2値は1.0となった。 (10ページ)

※ 1 エポック = 325イタレーション

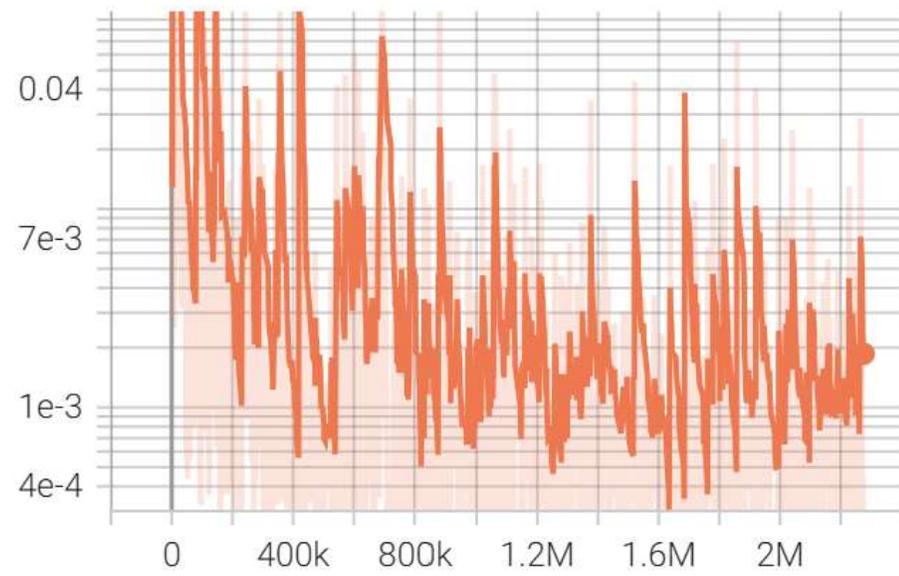
train_loss
tag: train_loss



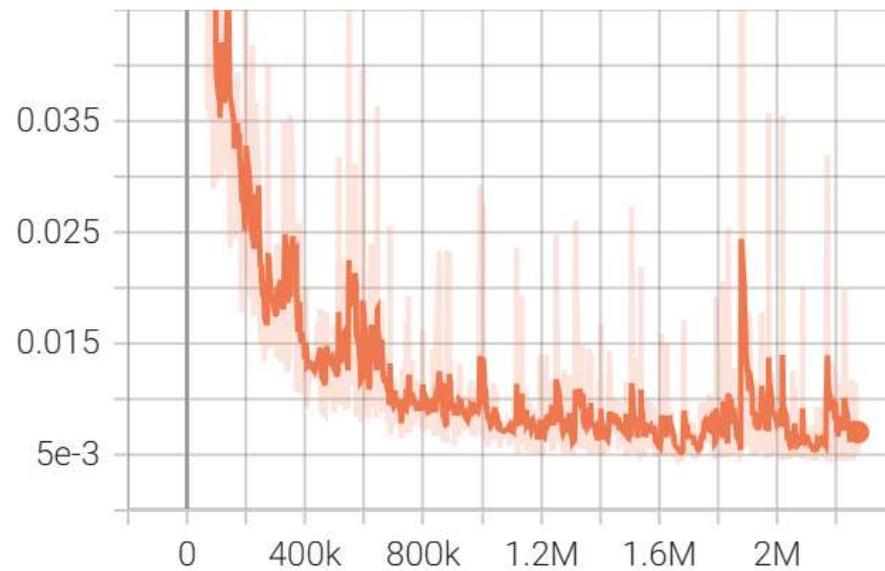
u
tag: u



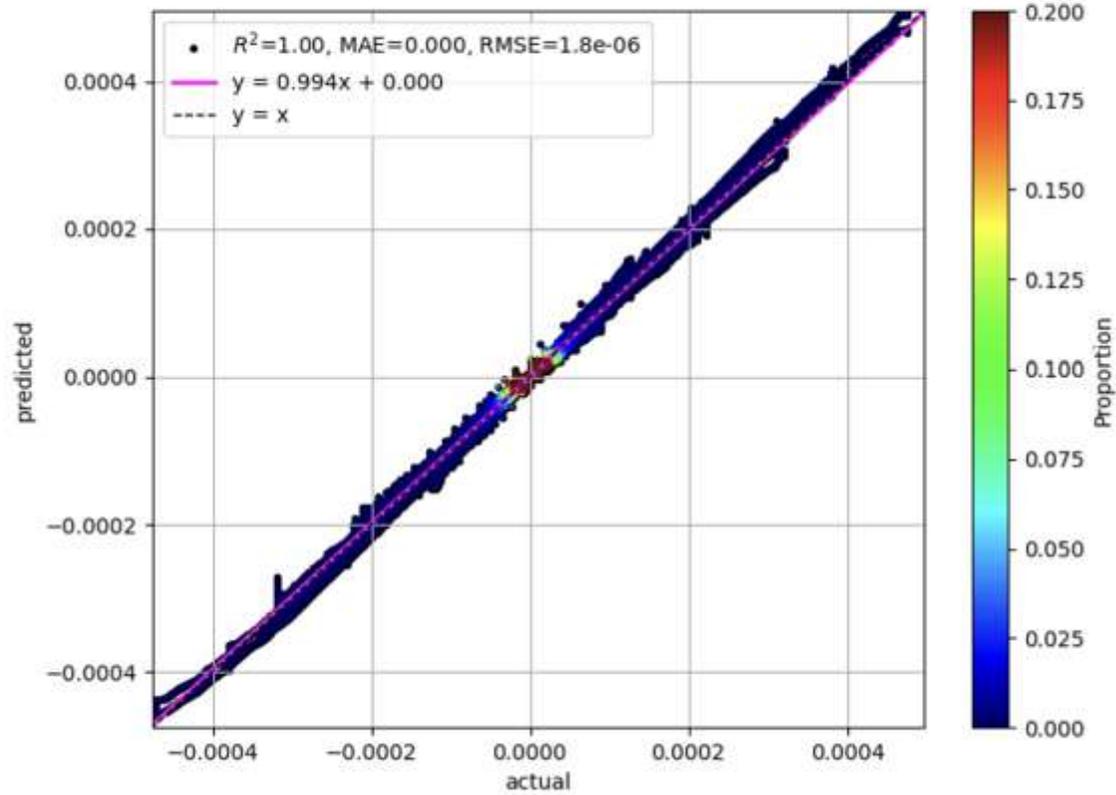
w
tag: w



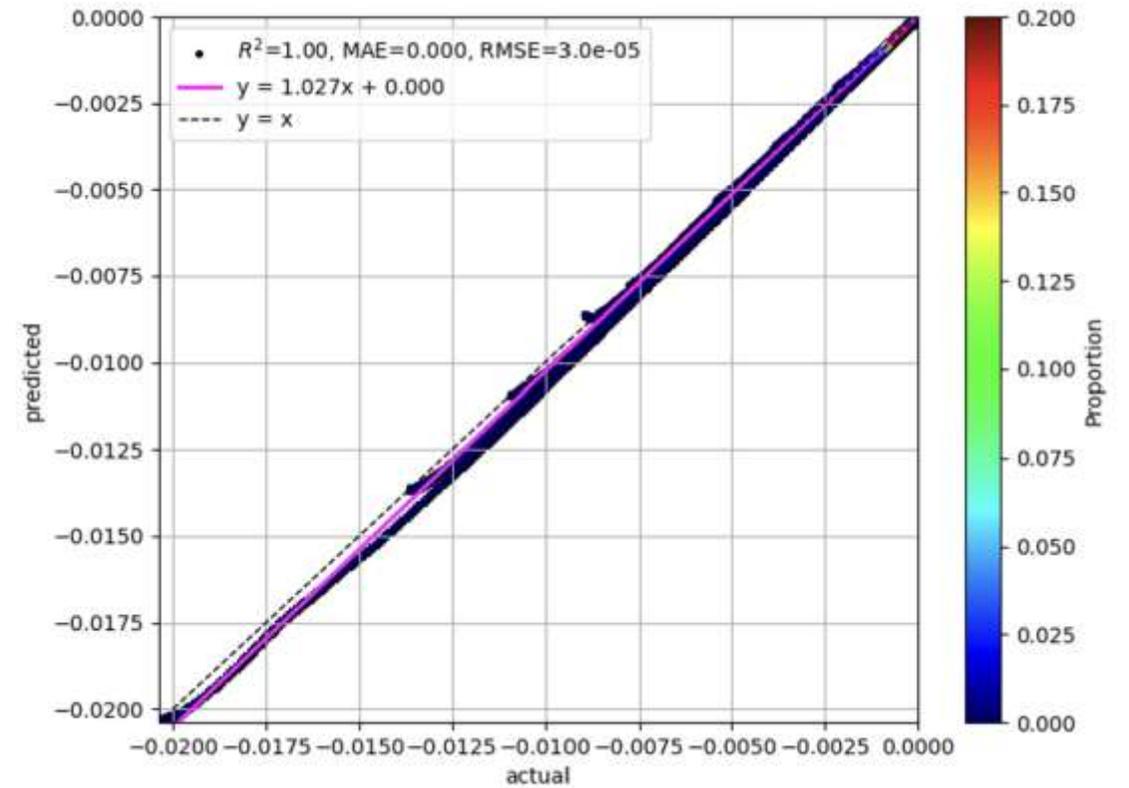
epoch_train_loss
tag: epoch_train_loss



Displacement X



Displacement Z



変位類推結果（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5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：参照値）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を示した。（12ページ以降）

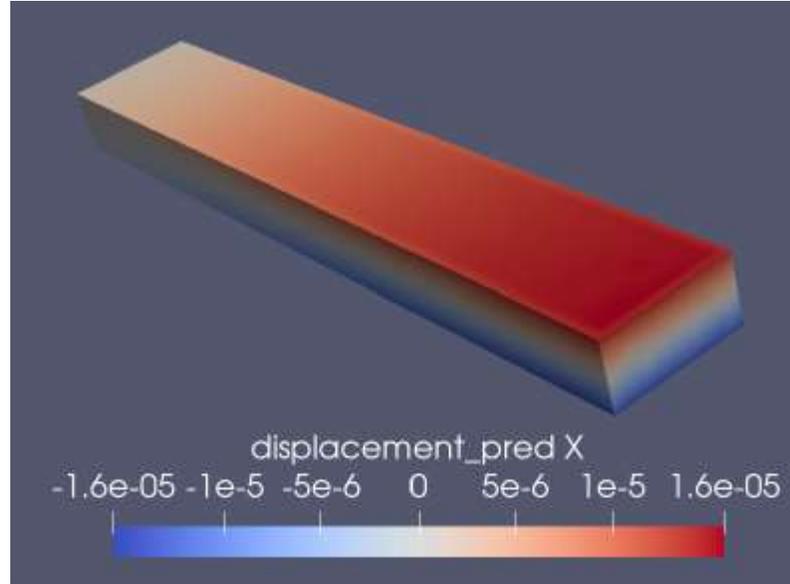
断面形状	Z方向変位（参照値）	Z方向変位（類推値）	誤差	備考
Rectangular	-3.00E-04	-2.90E-04	0.03	Height: 11,Width: 13,Length: 75
Hollow rectangular	-3.00E-04	-2.90E-04	0.03	Height: 10,Width: 15,Thickness: 1.5,Length: 120
Circular	-4.60E-04	-4.70E-04	0.02	Radius: 8,Length: 100
Hollow circular	-5.20E-04	-5.00E-04	0.04	Radius: 7.5,Thickness: 1,Length: 120
I shape	-2.30E-04	-2.20E-04	0.04	Height: 12,w: 12,t1: 3,t2: 1.5,Length: 120

Rectangular section

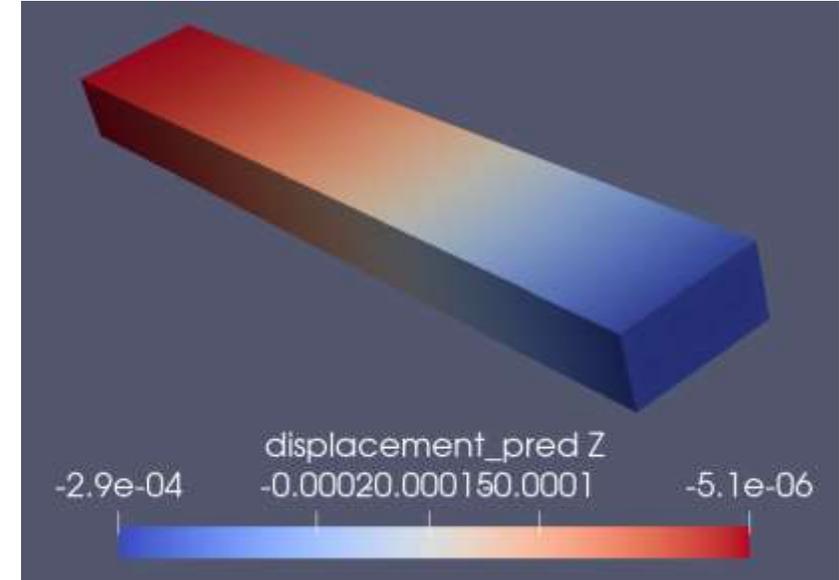
- Height: 5
- Width: 10
- Length: 60

Predict

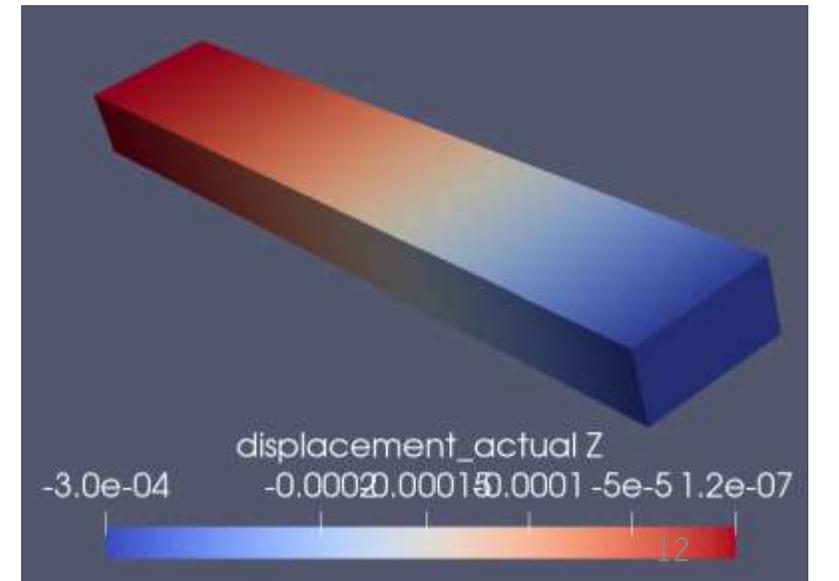
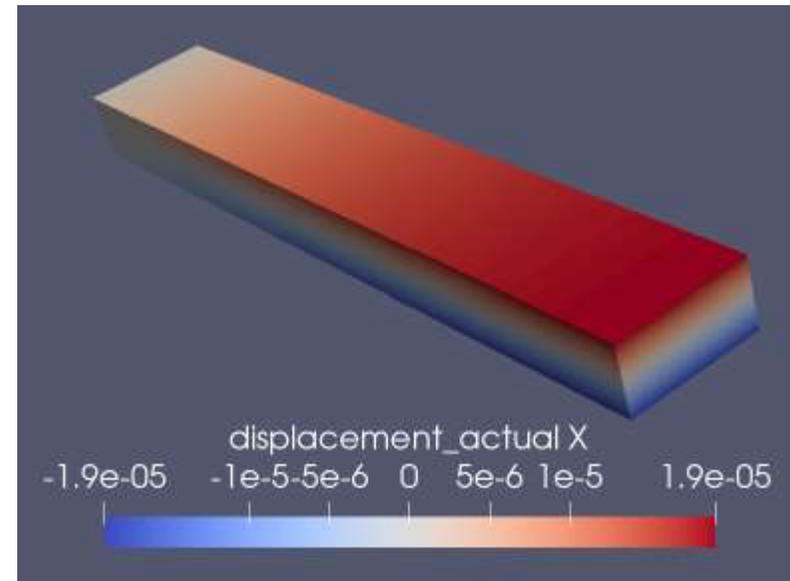
Displacement X



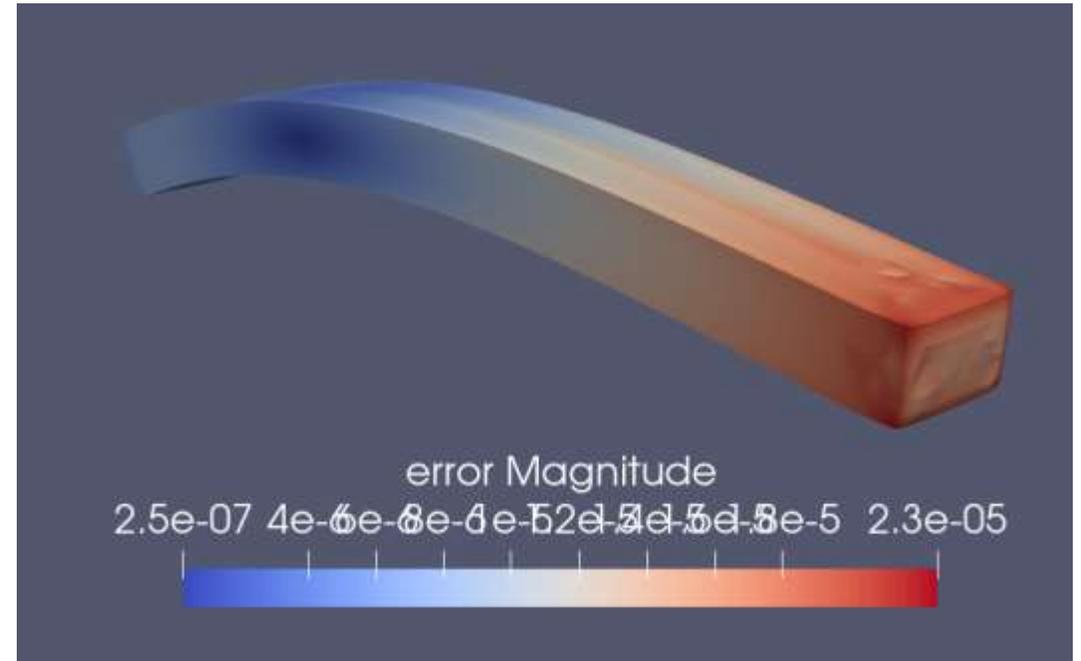
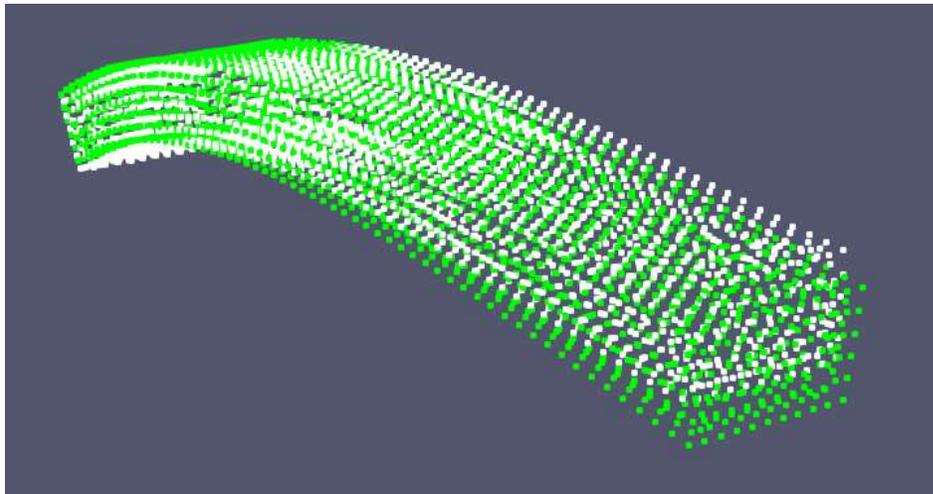
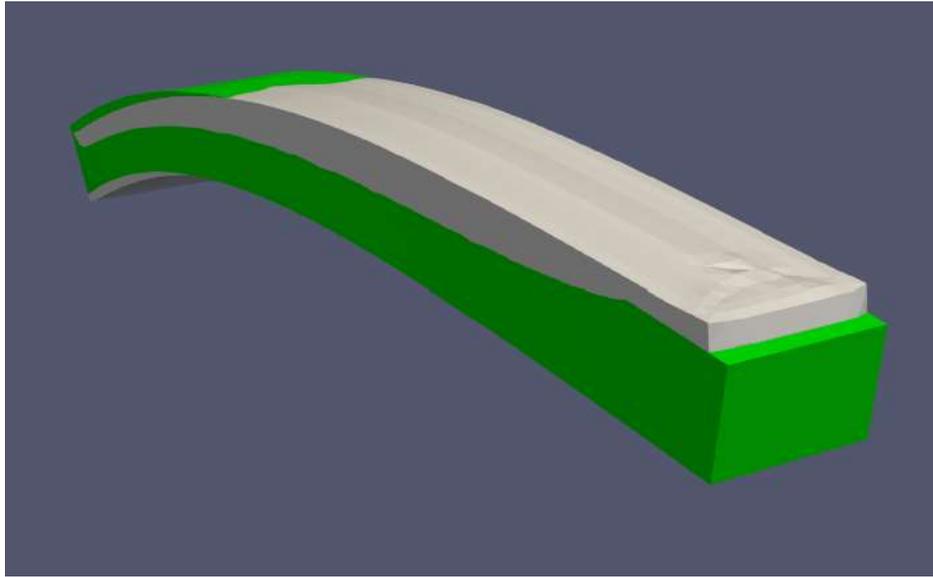
Displacement Z



Actual



Deformation

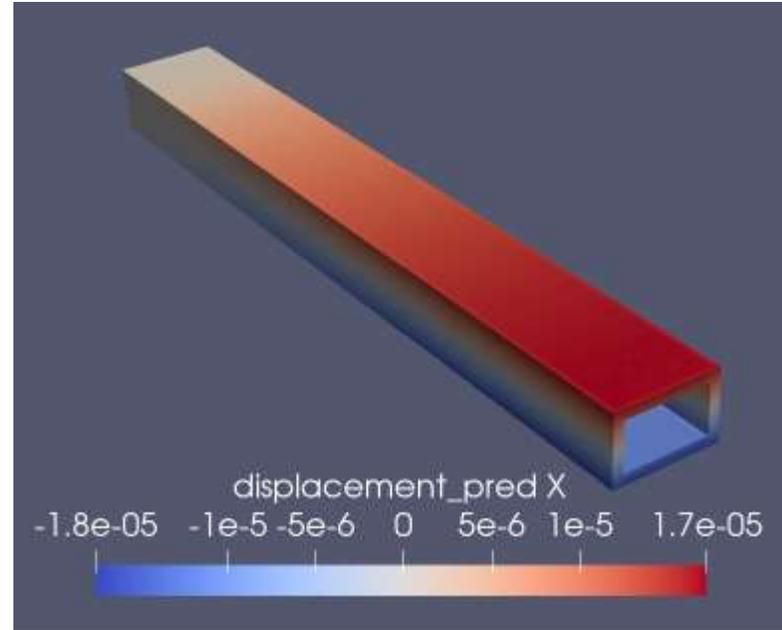


Hollow rectangular section

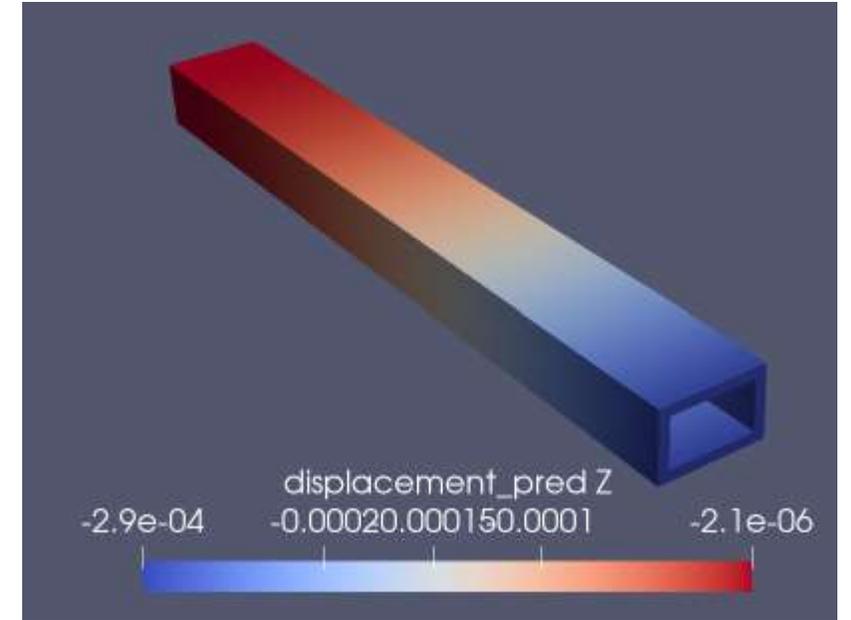
- Height: 10
- Width: 15
- Thickness: 1.5
- Length: 120

Predict

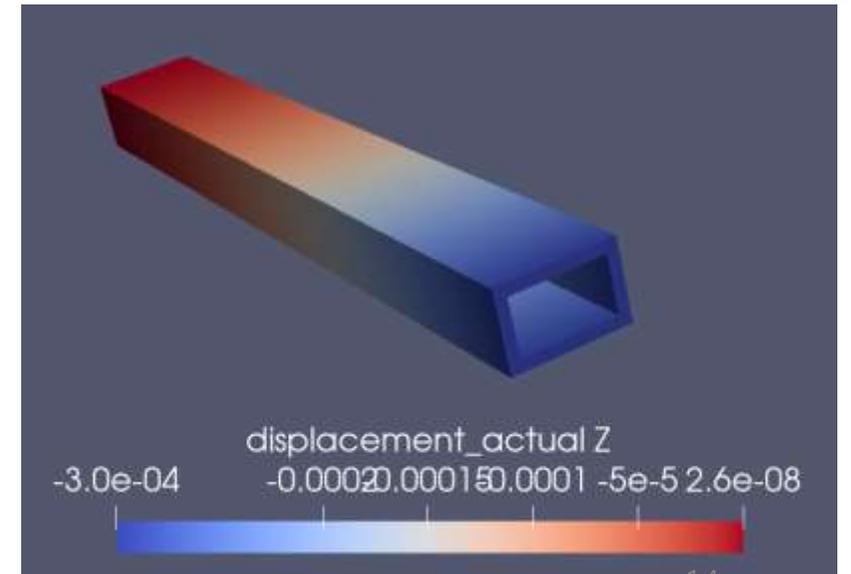
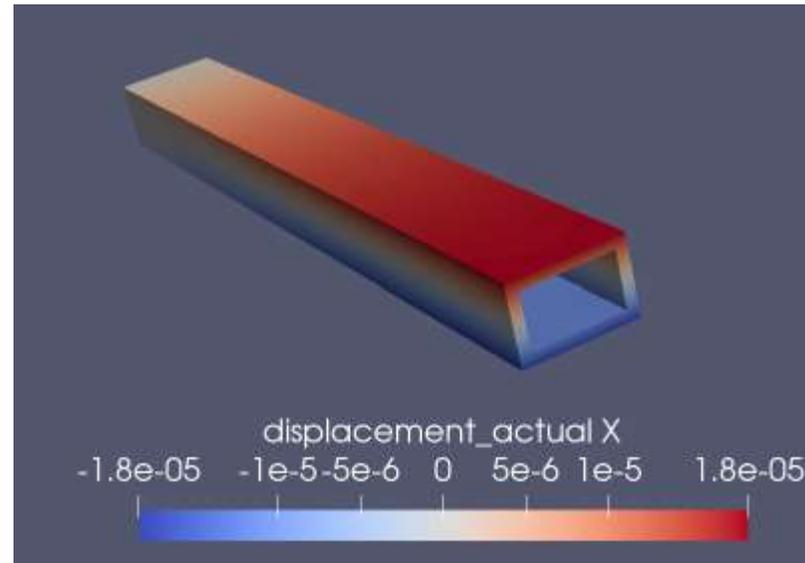
Displacement X



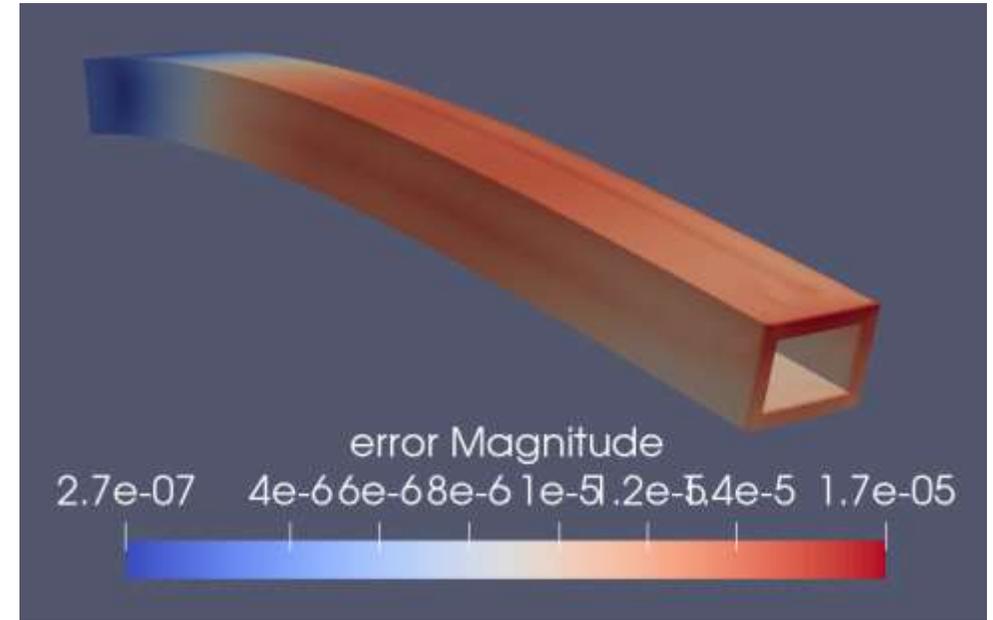
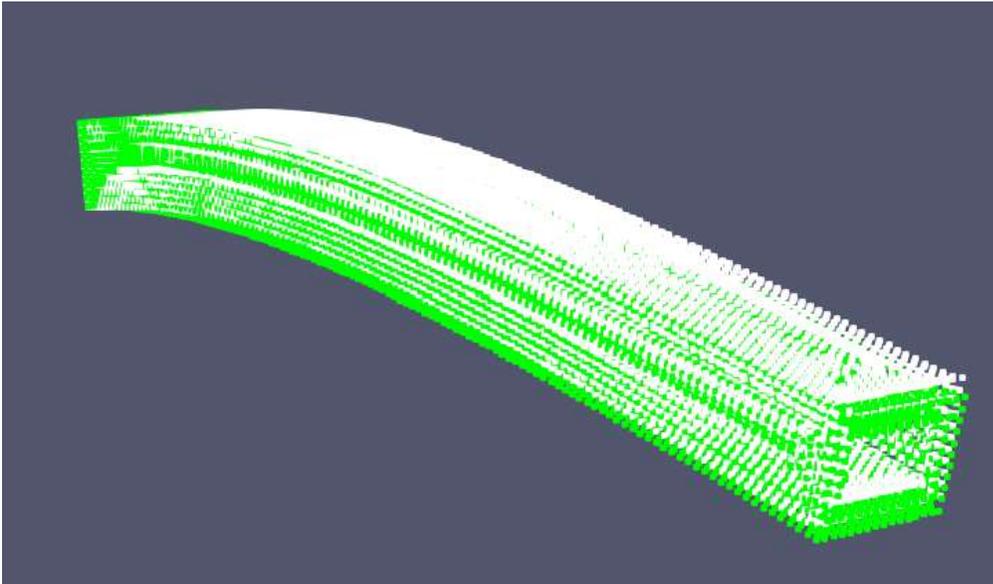
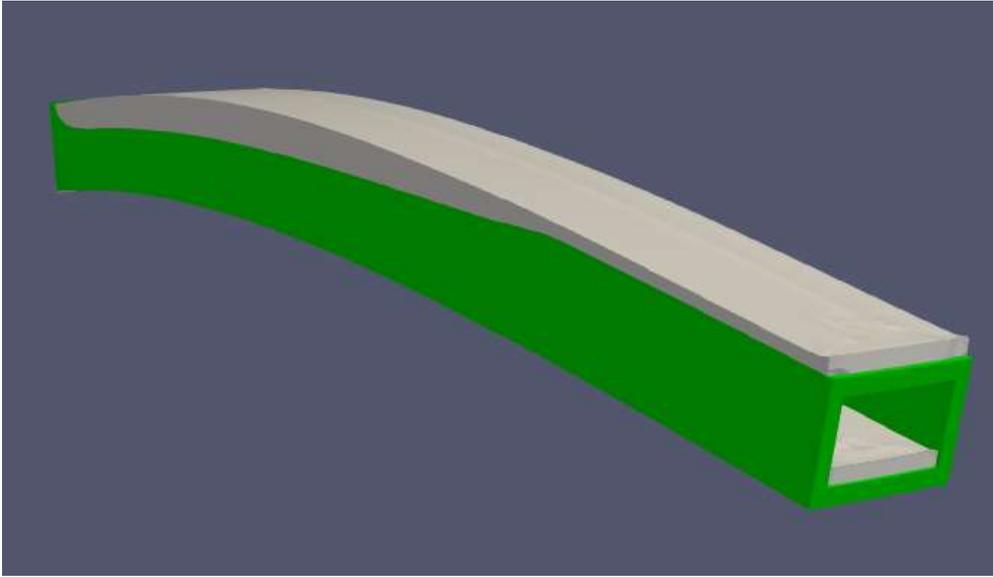
Displacement Z



Actual



Deformation

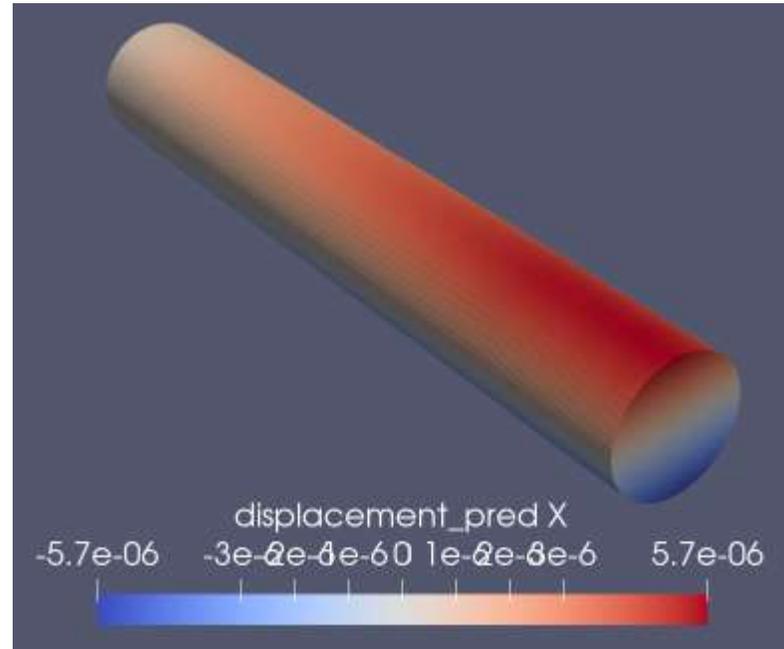


Circular section

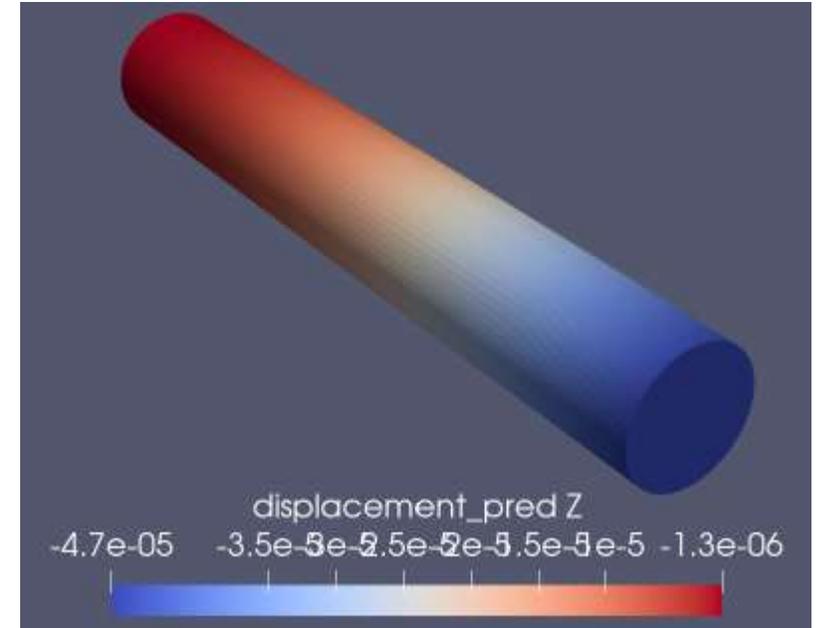
- Radius: 8
- Length: 100

Predict

Displacement X

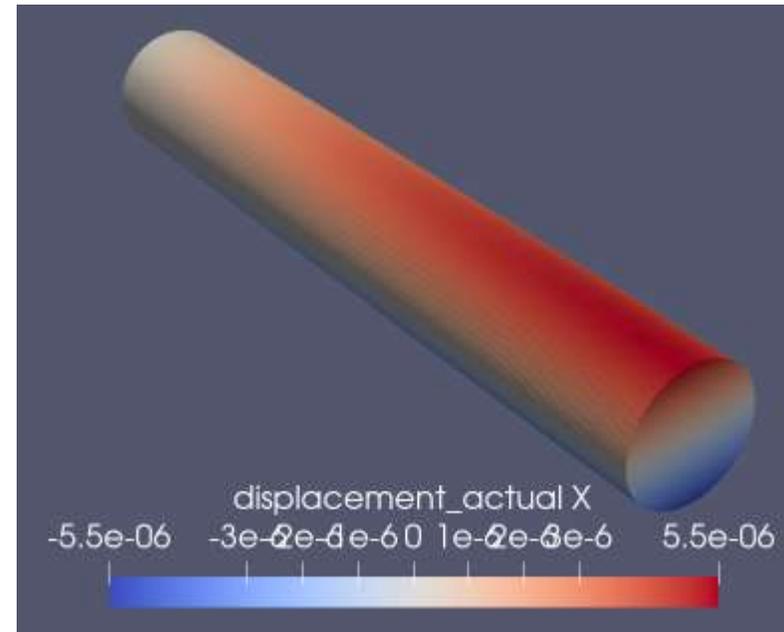


Displacement Z

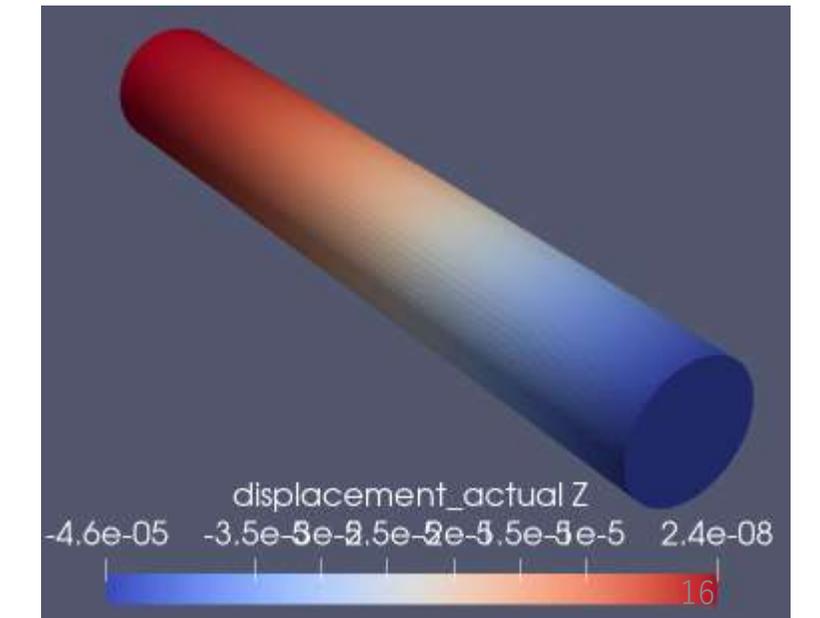


Actual

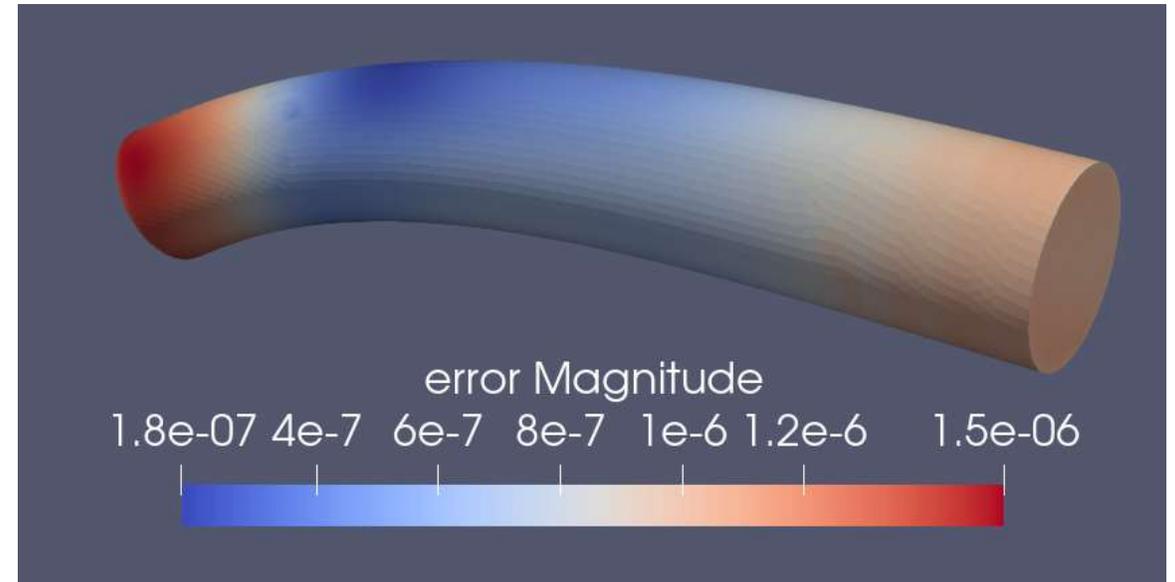
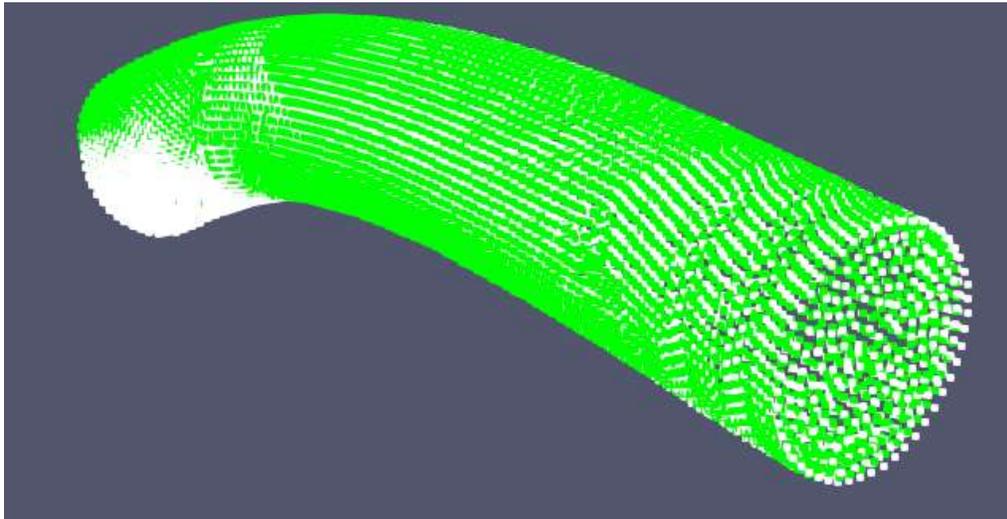
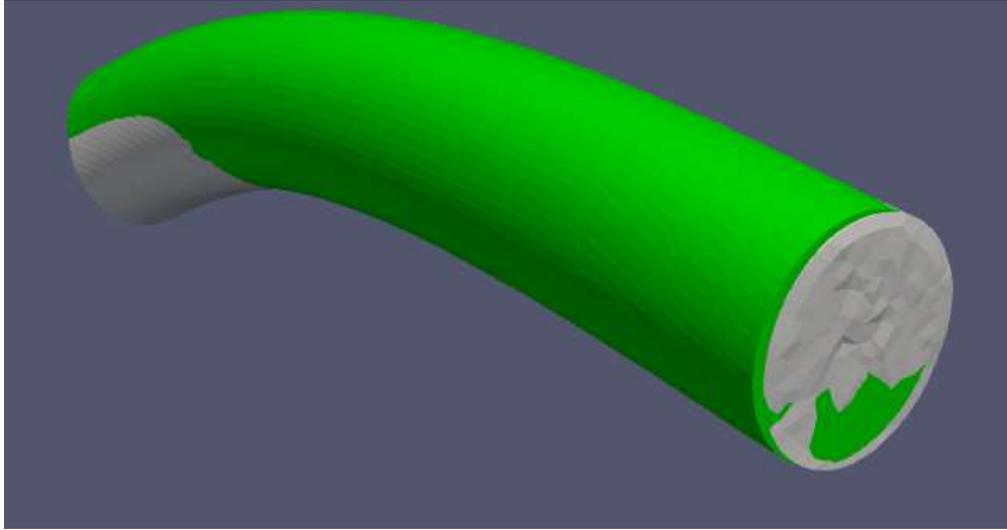
Displacement X



Displacement Z



Deformation

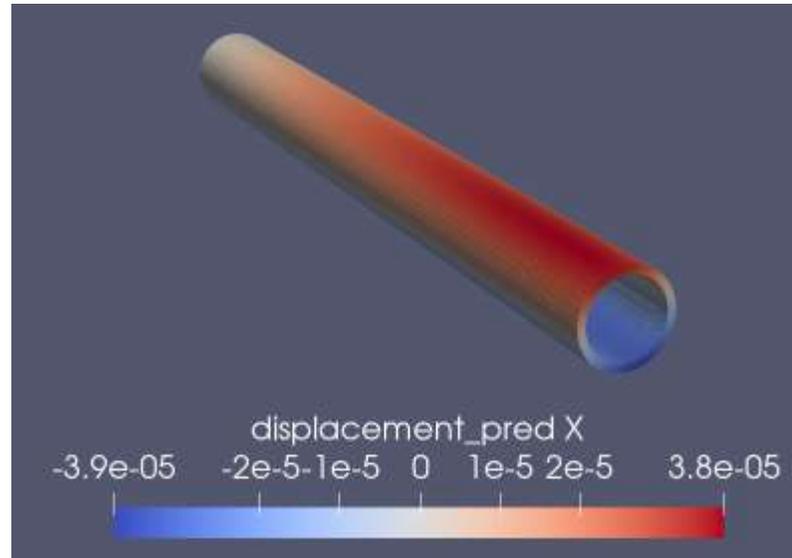


Hollow circular section

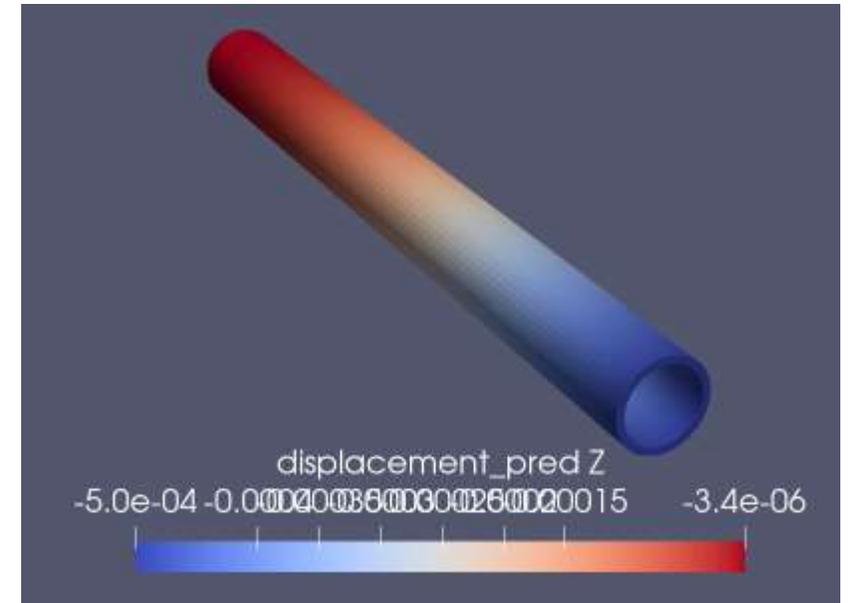
- Radius: 7.5
- Thickness: 1
- Length: 120

Predict

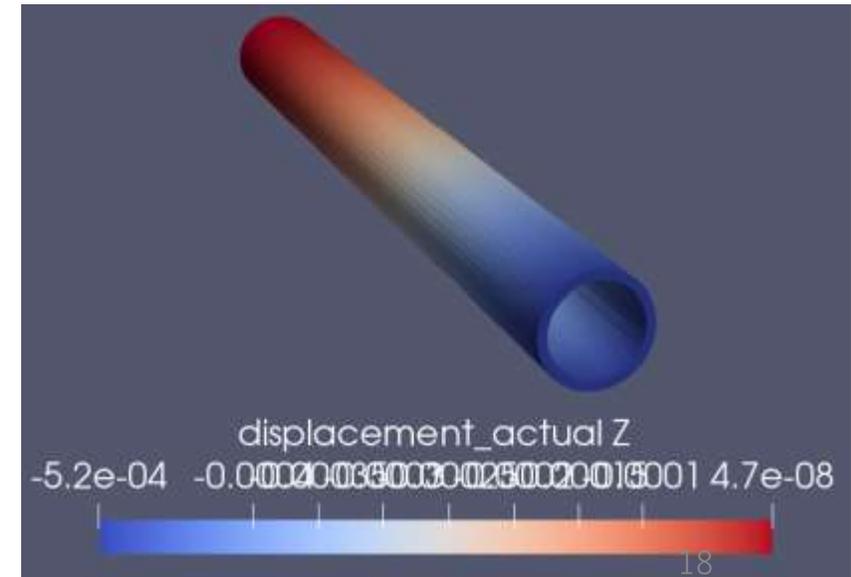
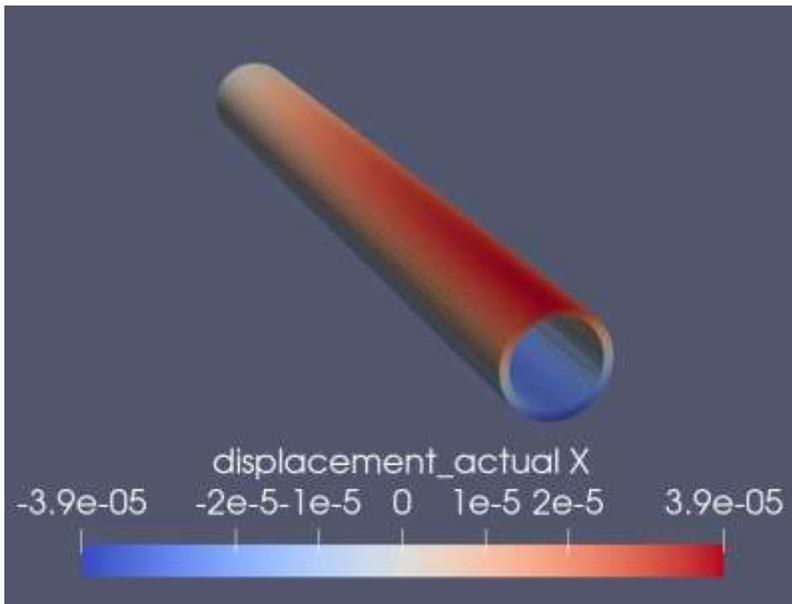
Displacement X



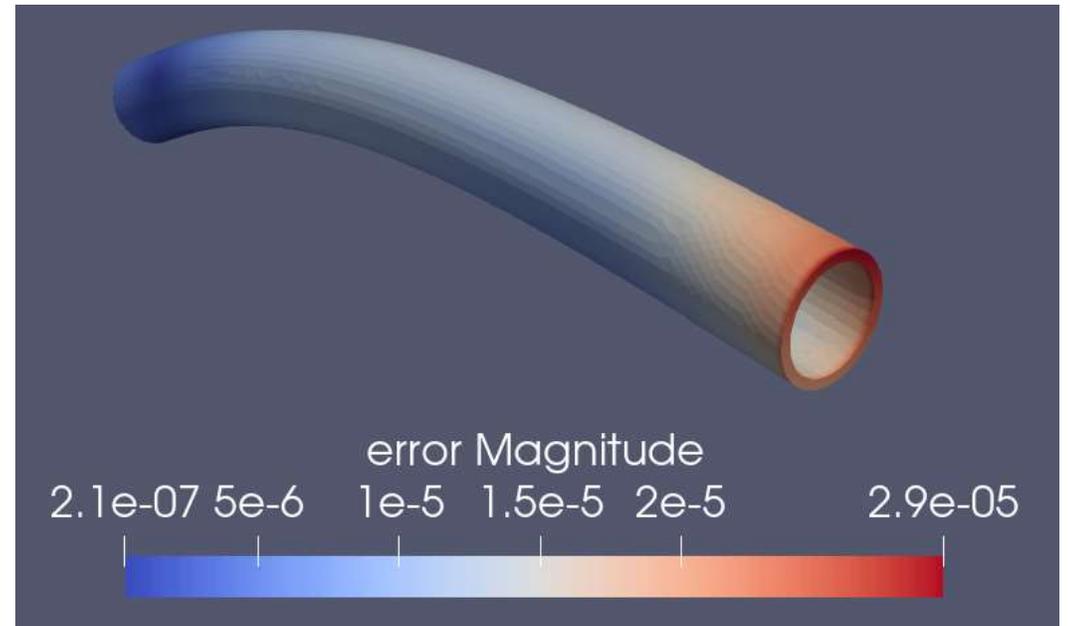
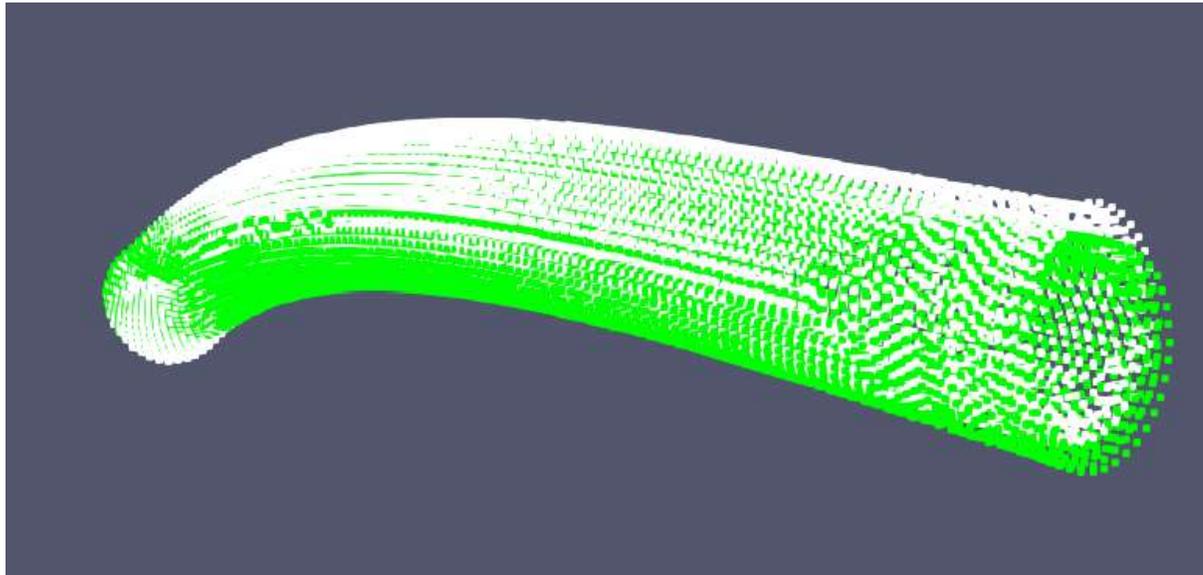
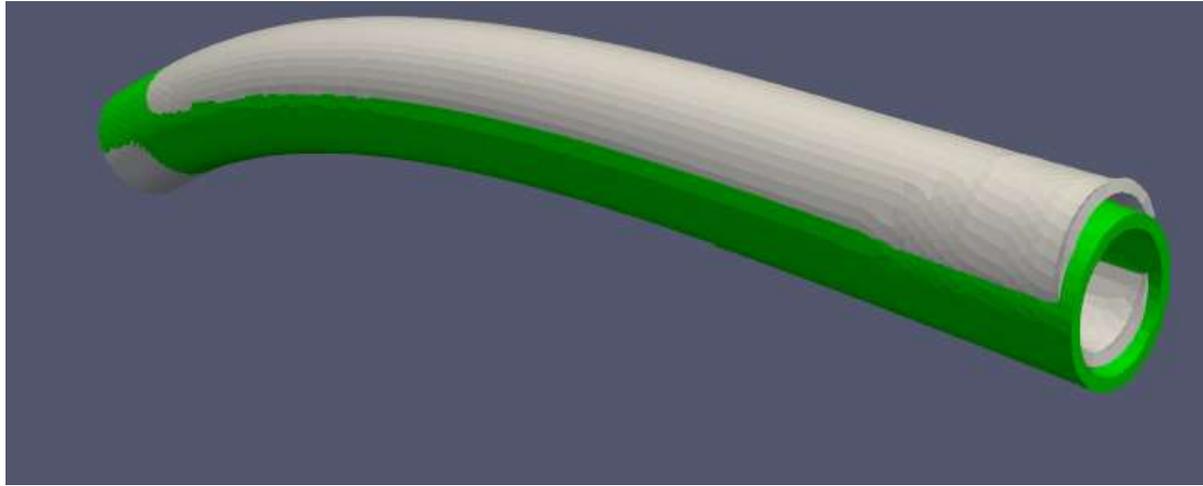
Displacement Z



Actual



Deformation

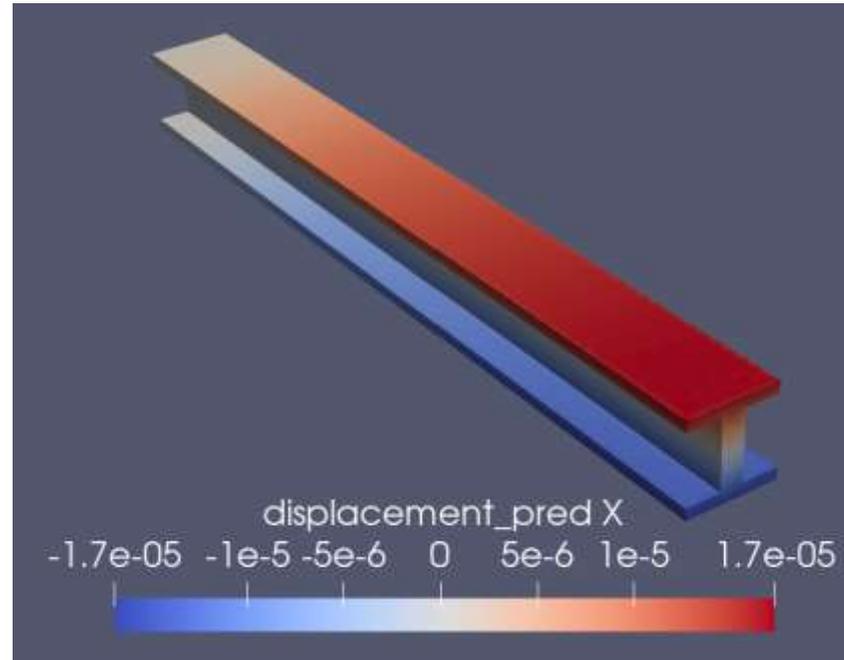


I shape section

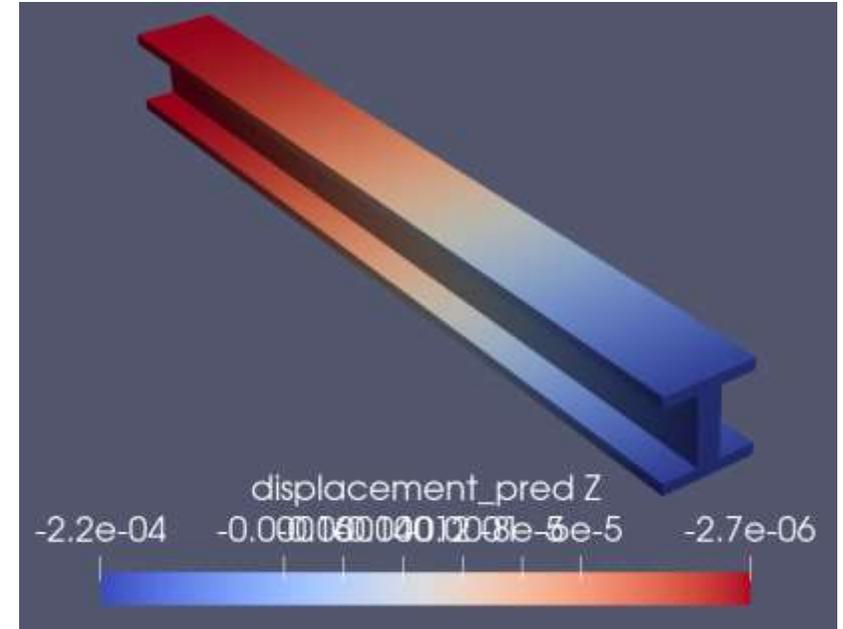
- Height: 12
- w: 12
- t1: 3
- t2: 1.5
- Length: 120

Predict

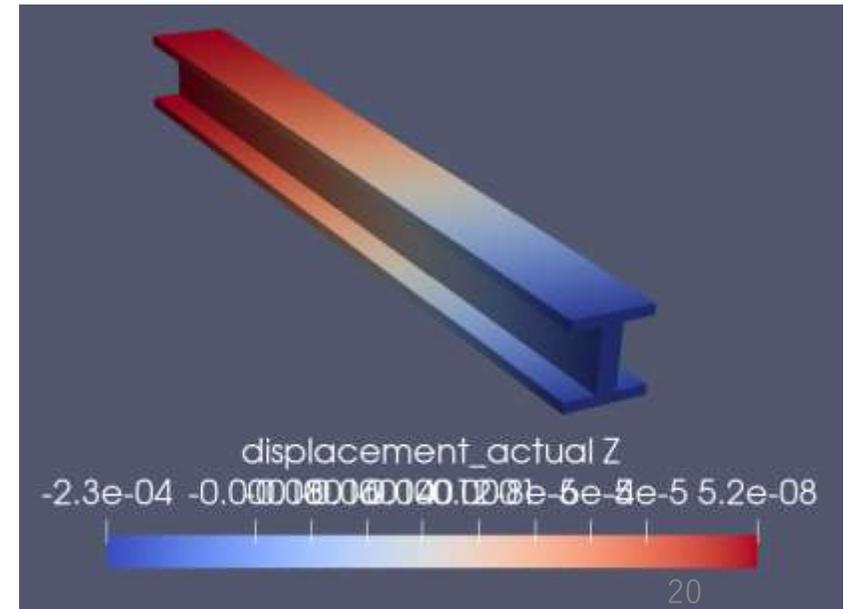
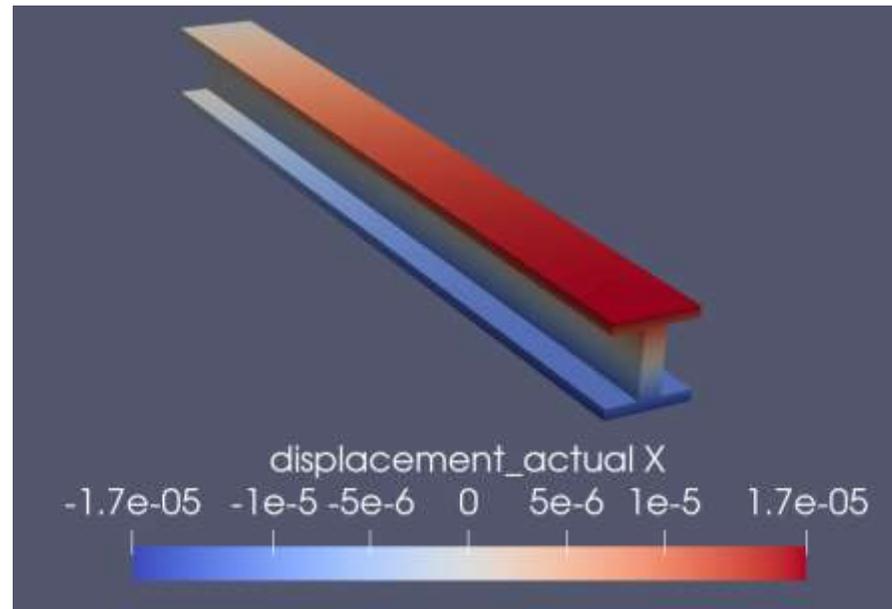
Displacement X



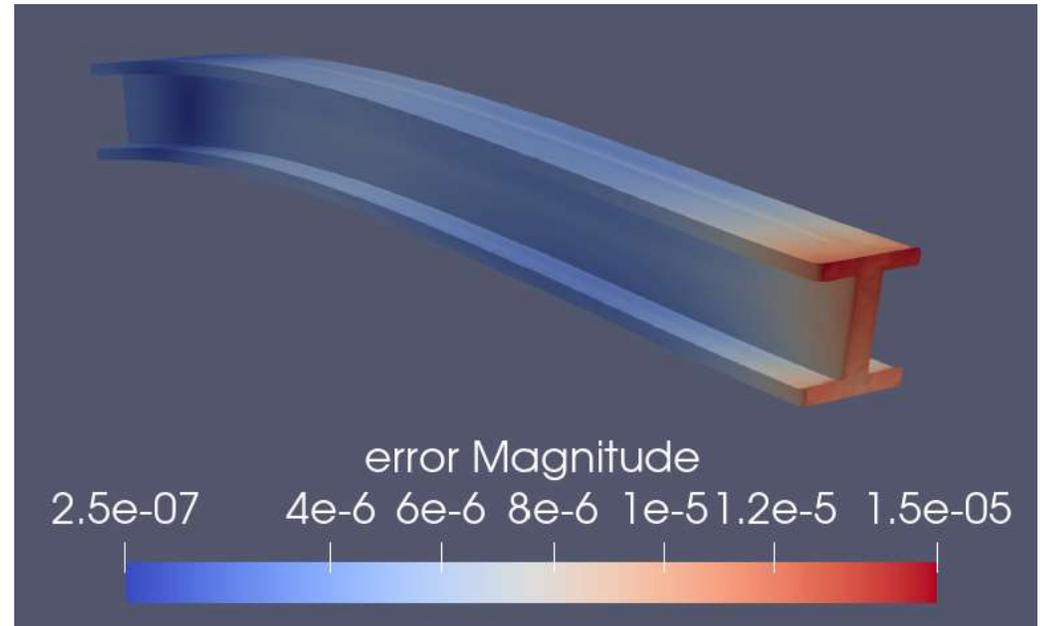
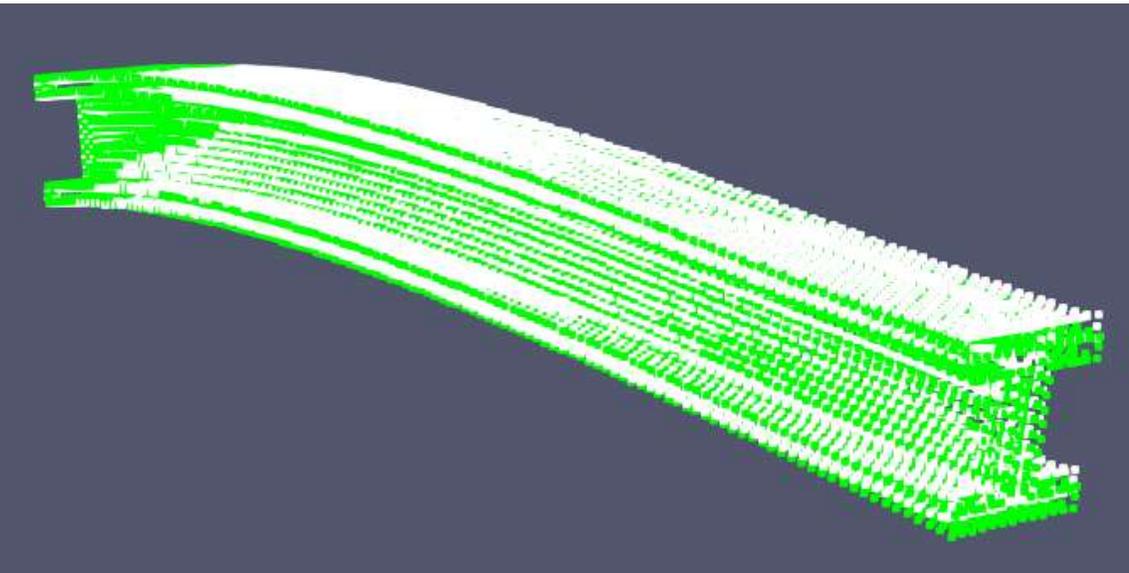
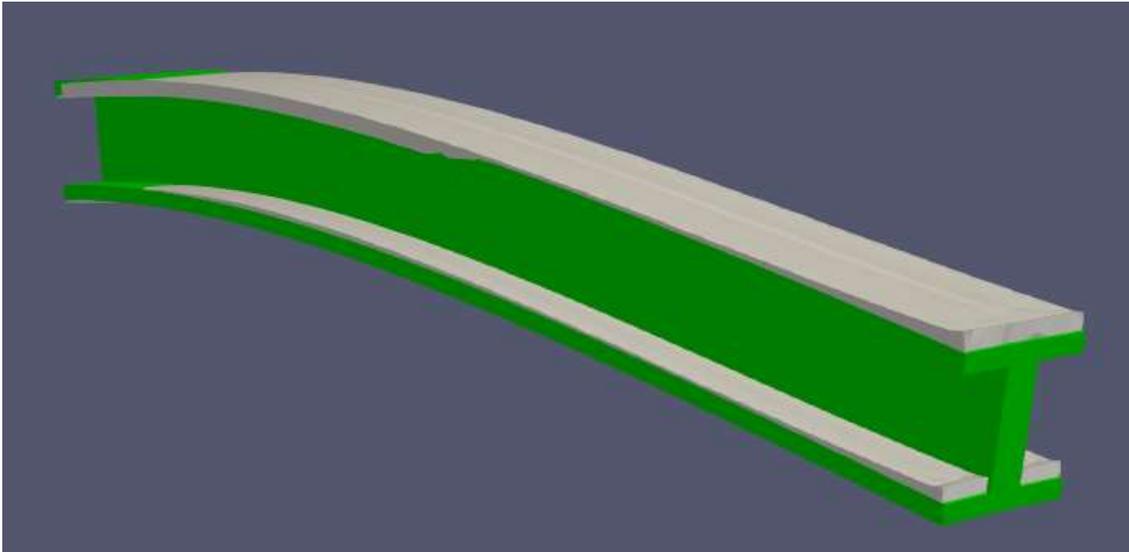
Displacement Z



Actual



Deformation



変位類推結果（未知モデル）

- トレーニングしたサロゲートモデルを使い、未知モデルであるトレーニングに使用しない形状寸法における類推結果を検証した。
- 下表の5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：参照値）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を示した。（23ページ以降）

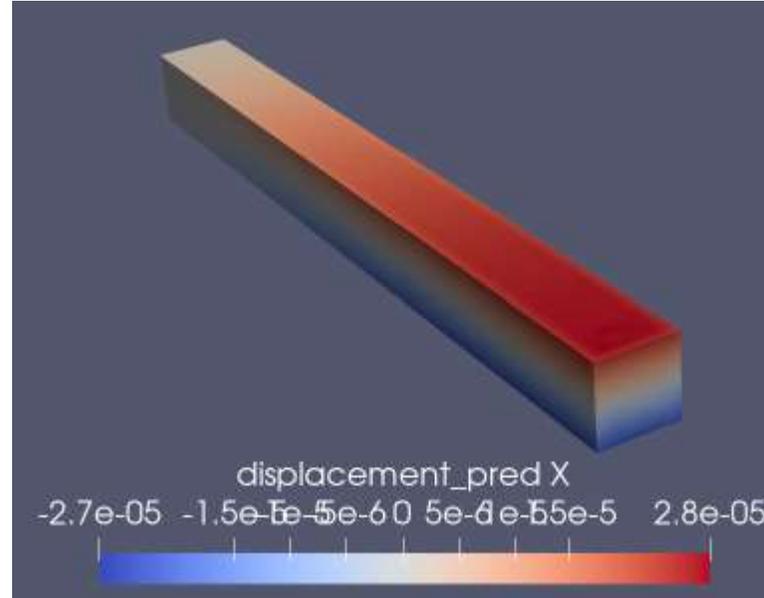
断面形状	Z方向変位（参照値）	Z方向変位（類推値）	誤差	備考
Rectangular	-3.70E-04	-4.40E-04	0.19	Height: 6,Width: 6,Length: 65
Hollow rectangular	-4.00E-04	-4.00E-04	0.00	Height: 10,Width: 5,Thickness: 1,Length: 90
Circular	-5.60E-05	-4.80E-05	0.14	Radius: 8,Length: 105
Hollow circular	-6.60E-05	-6.10E-05	0.08	Radius: 8,Thickness: 1.5,Length: 90
I shape	-1.60E-04	-1.60E-04	0.00	Height: 11,w: 11,t1: 2,t2: 2,Length: 100

Rectangular section

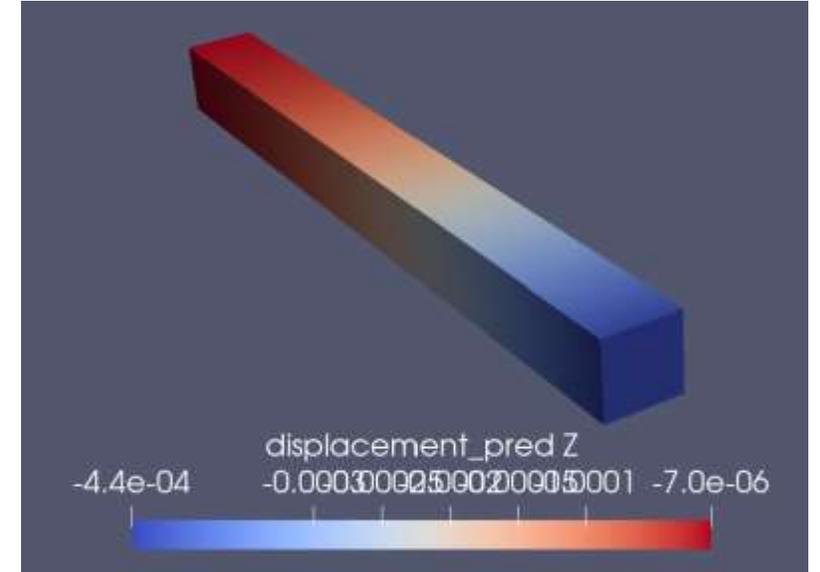
- Height: 6
- Width: 6
- Length: 65

Predict

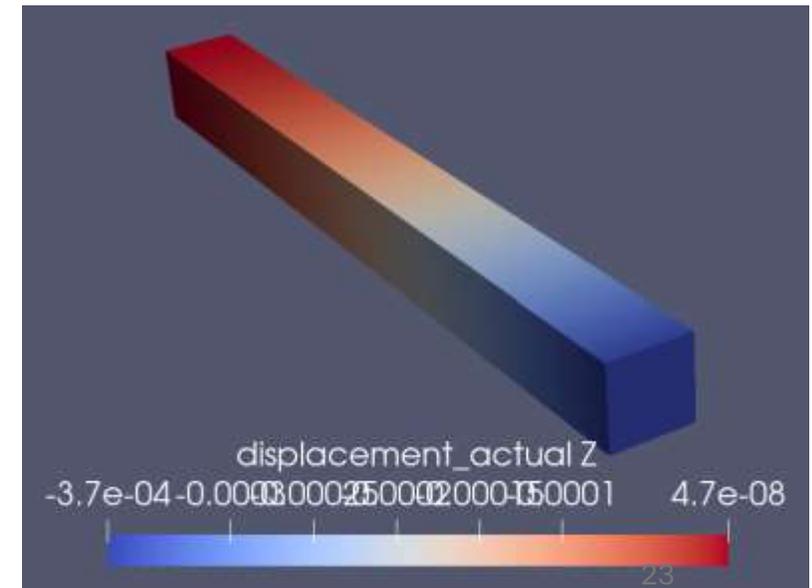
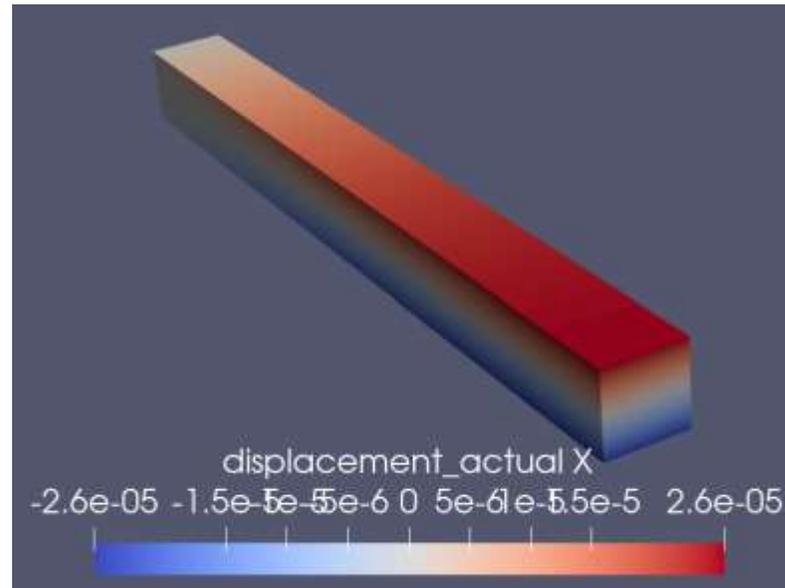
Displacement X



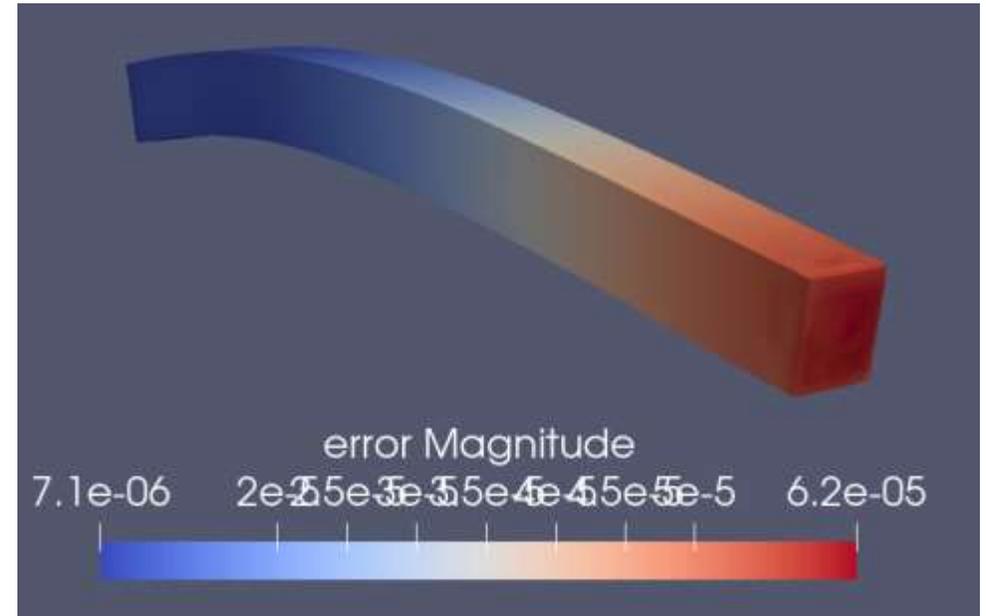
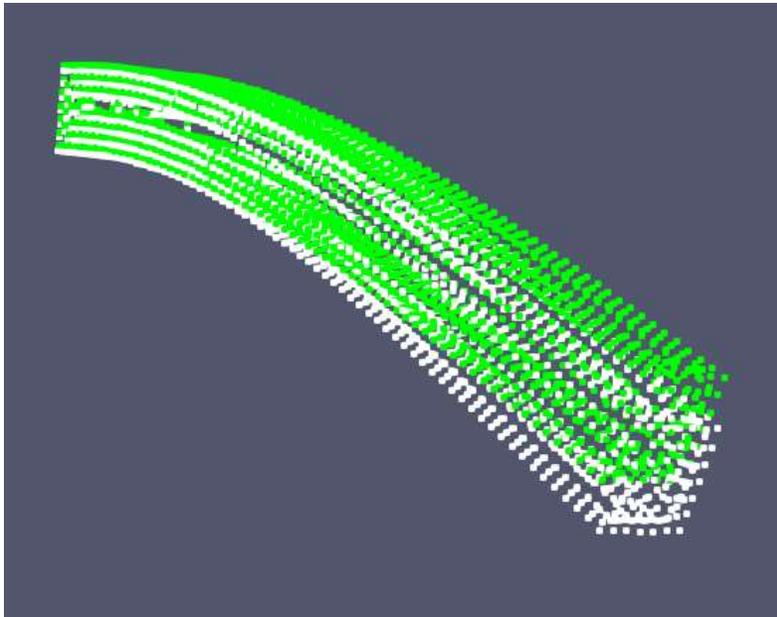
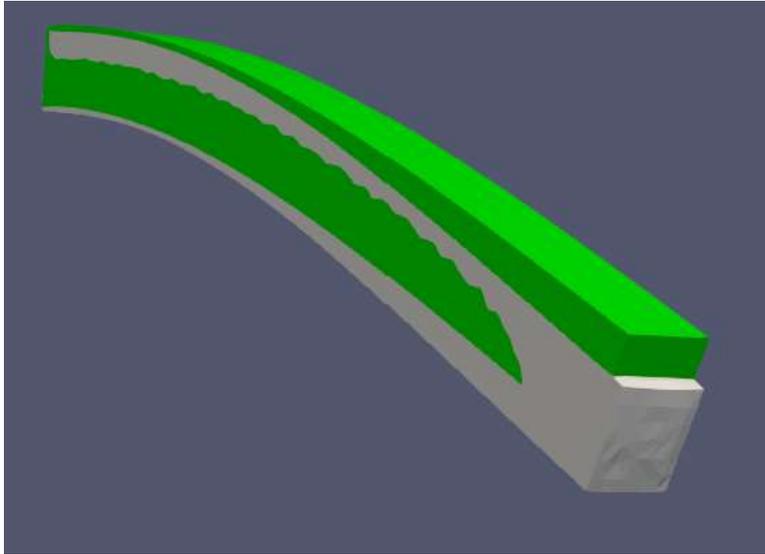
Displacement Z



Actual



Deformation

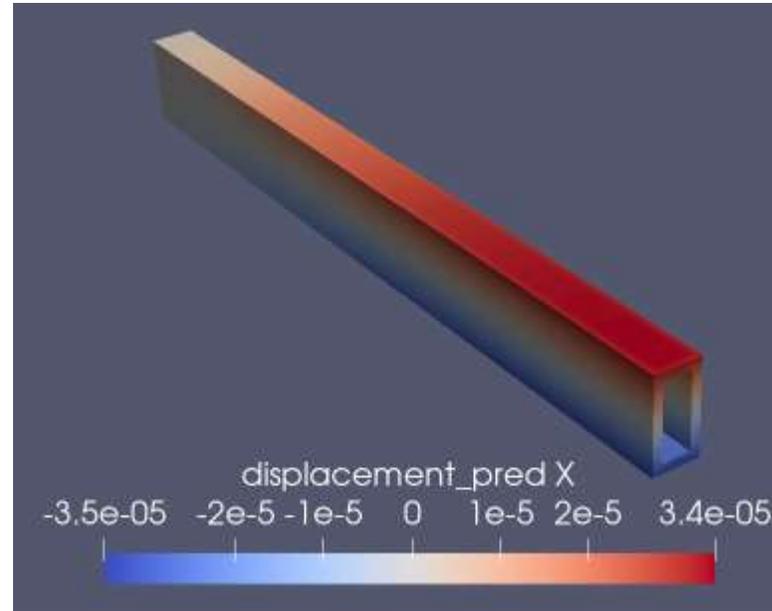


Hollow rectangular section

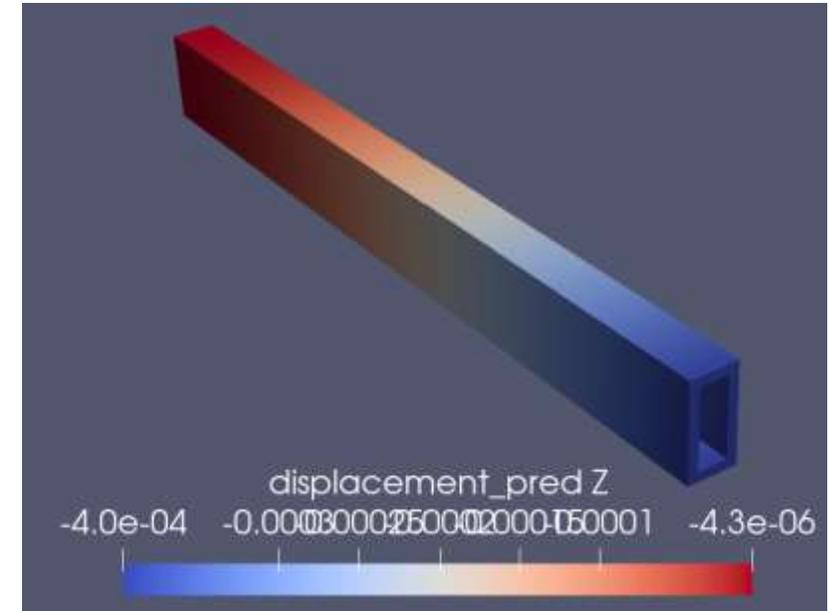
- Height: 10
- Width: 5
- Thickness: 1
- Length: 90

Predict

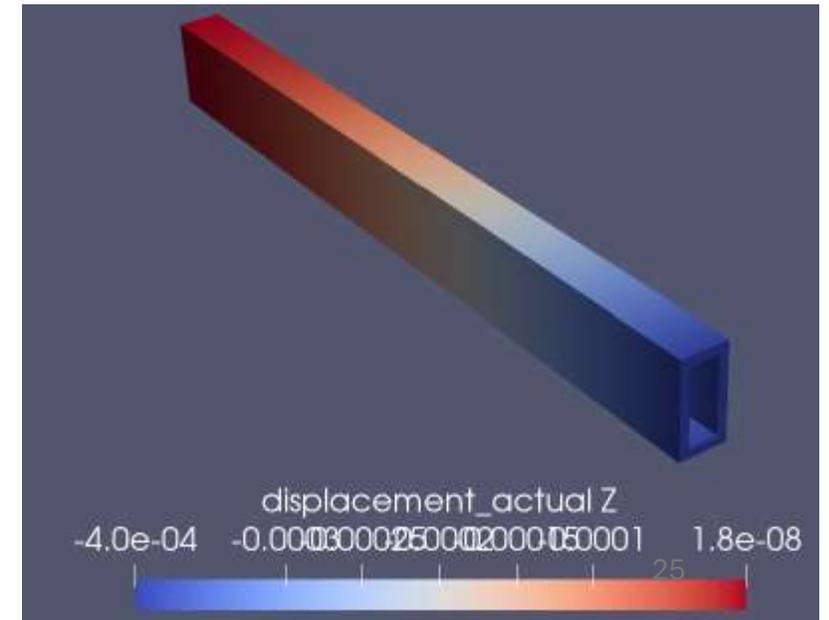
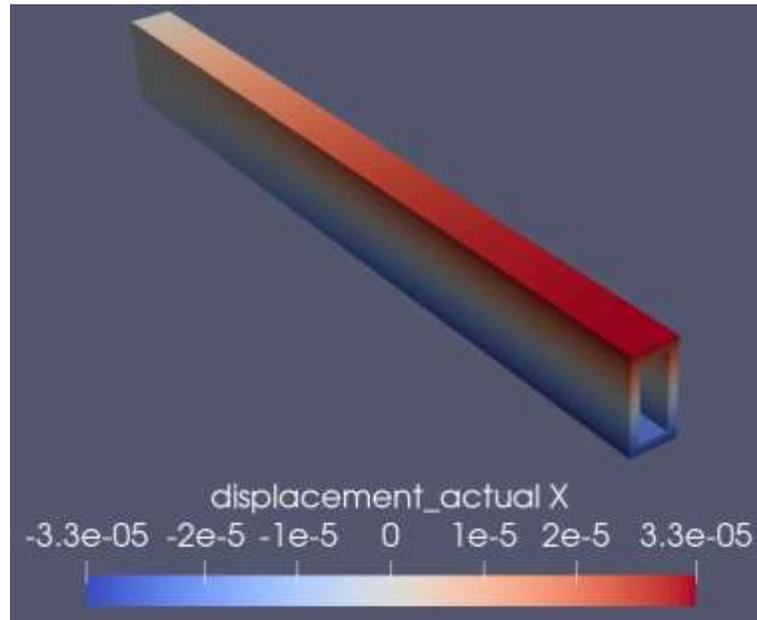
Displacement X



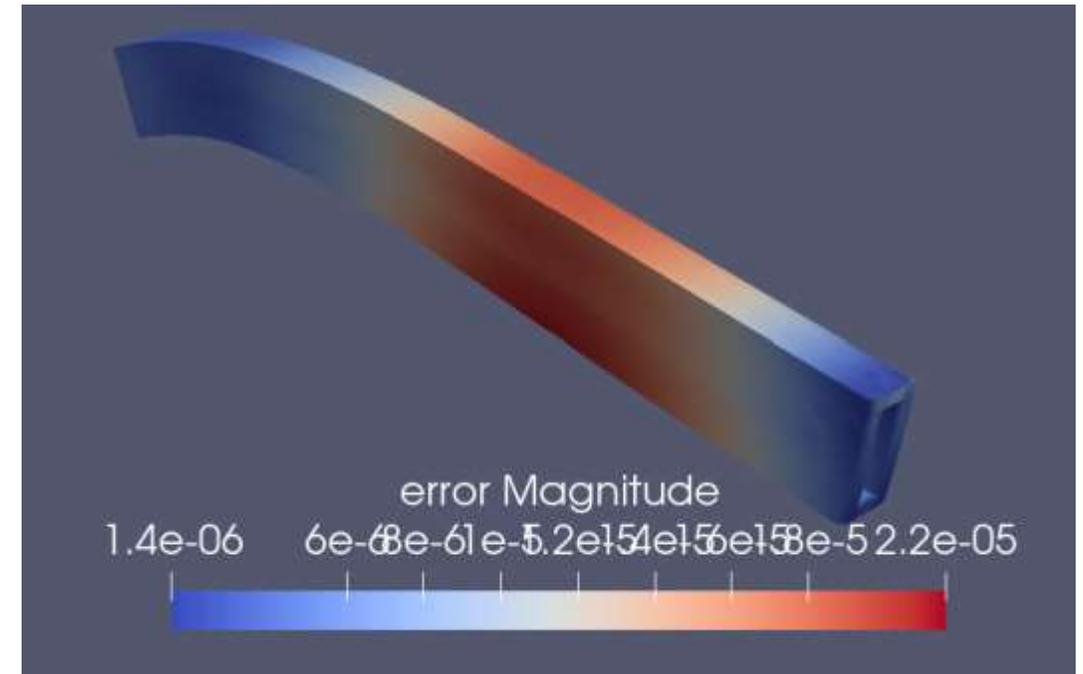
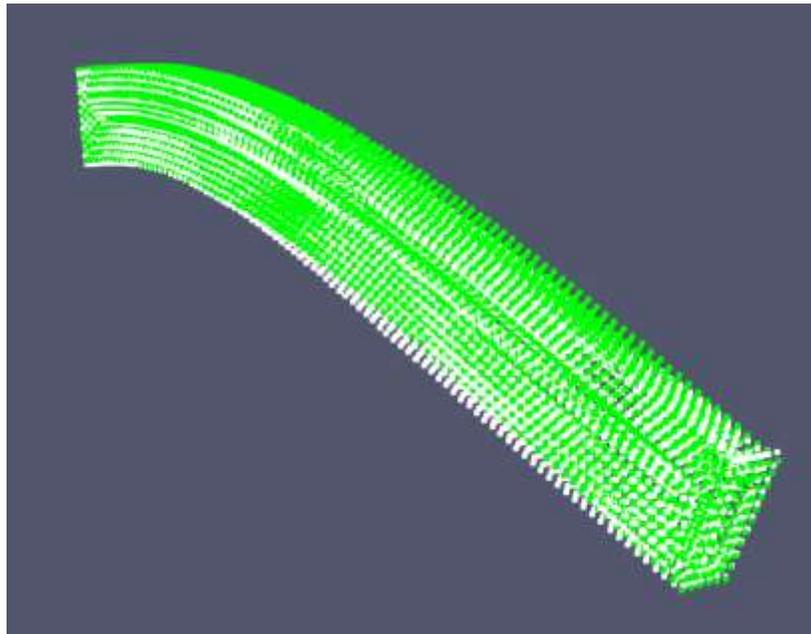
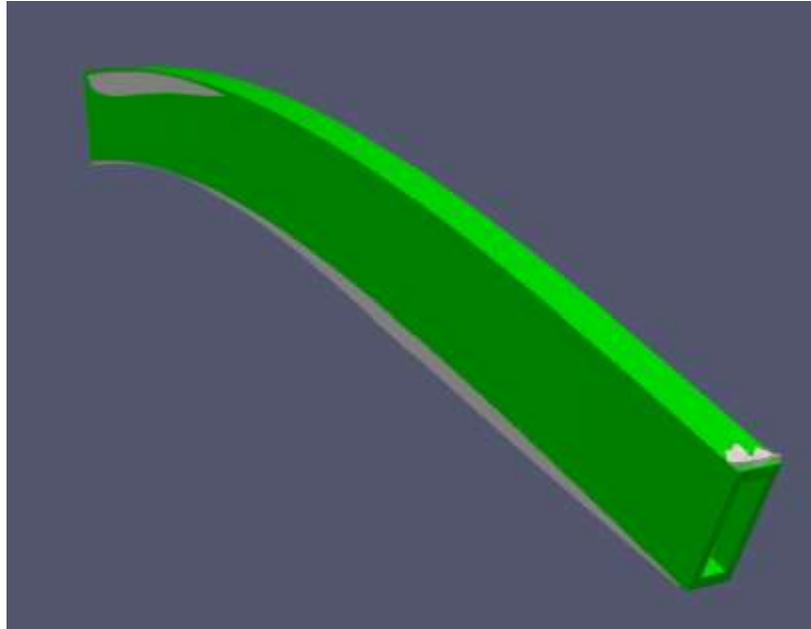
Displacement Z



Actual



Deformation



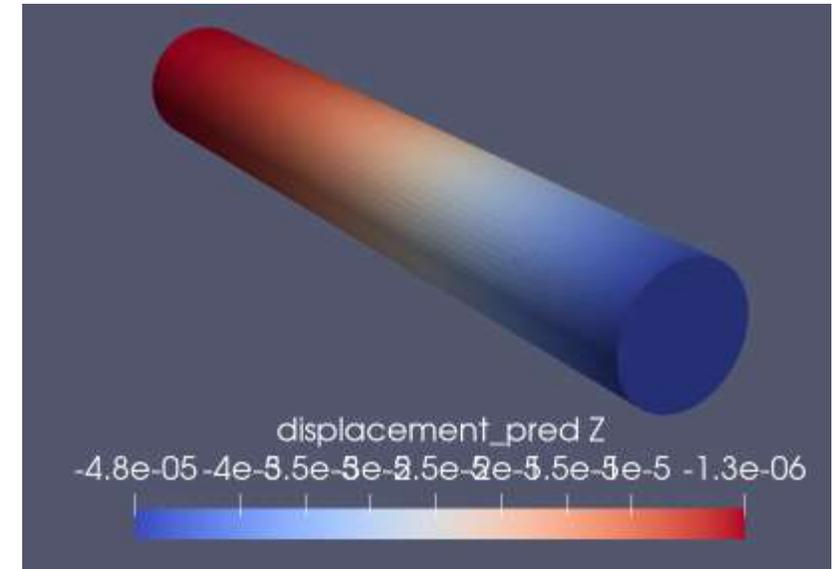
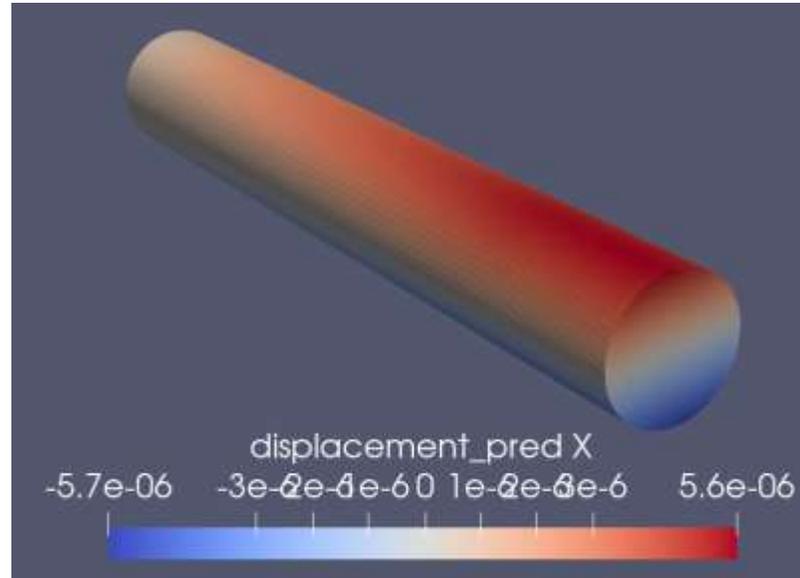
Circular section

- Radius: 8
- Length: 105

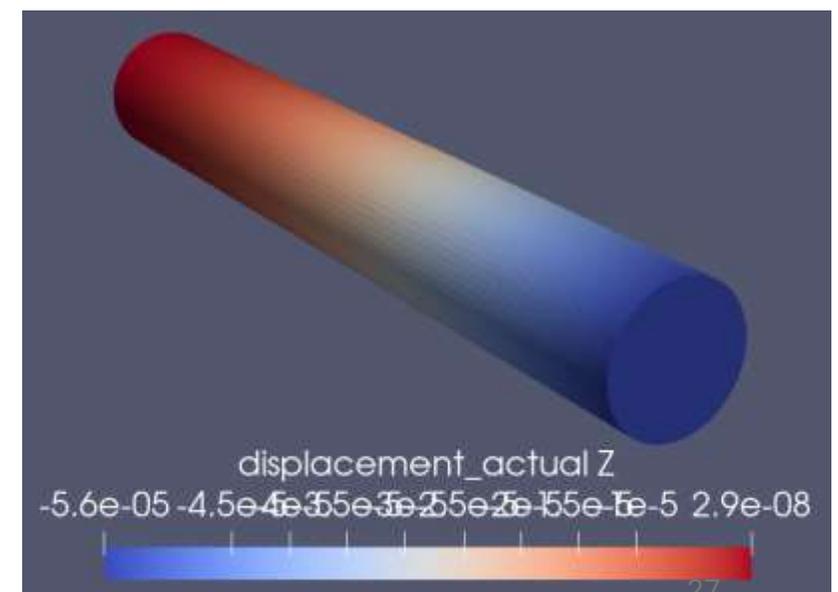
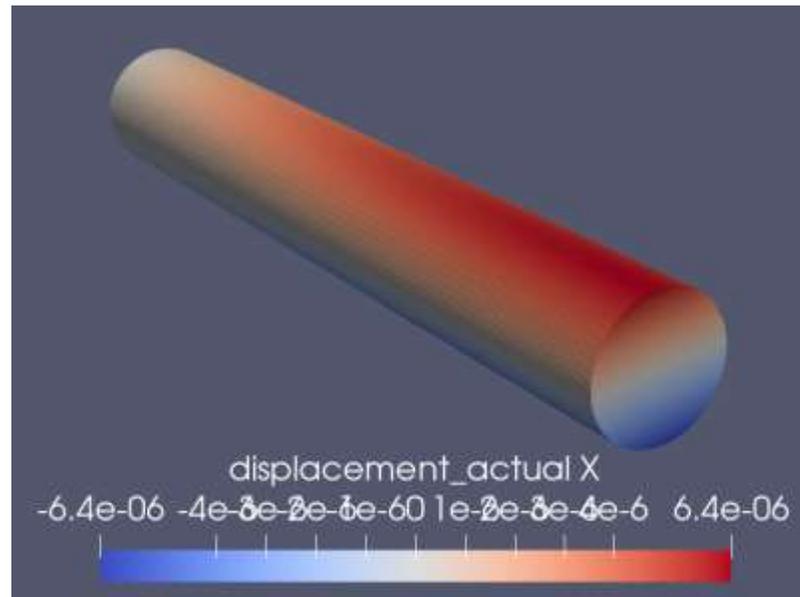
Displacement X

Displacement Z

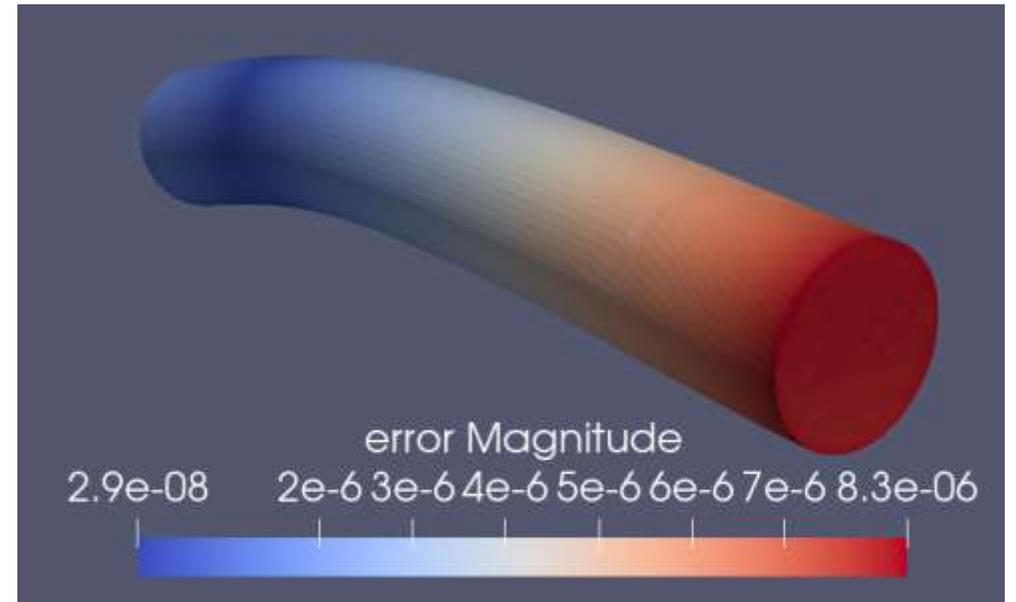
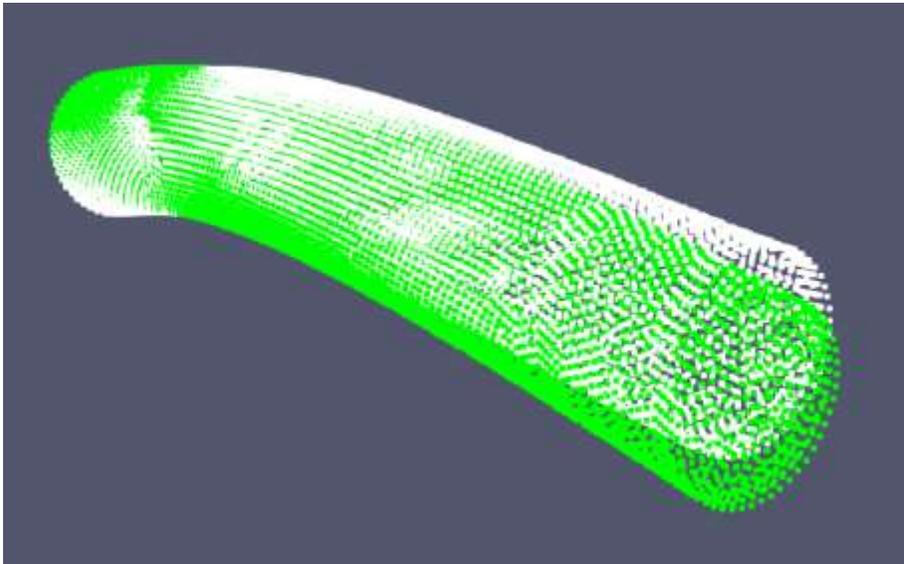
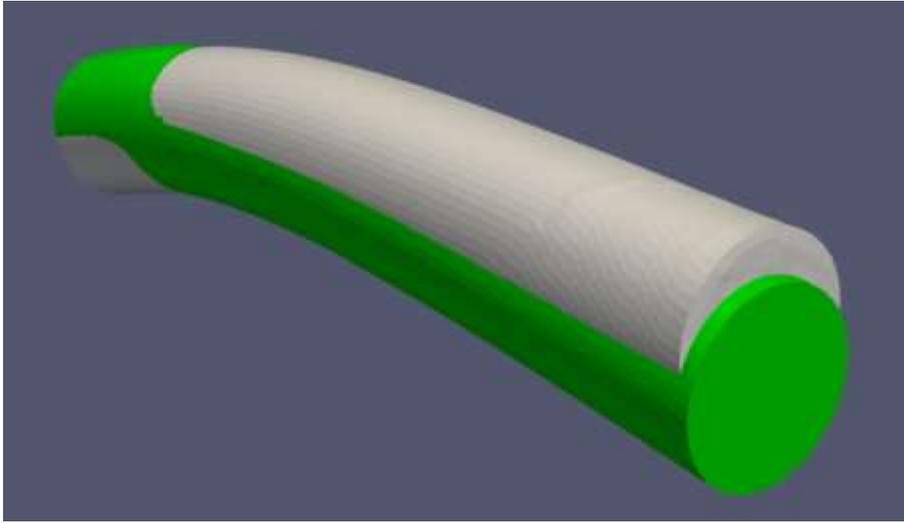
Predict



Actual



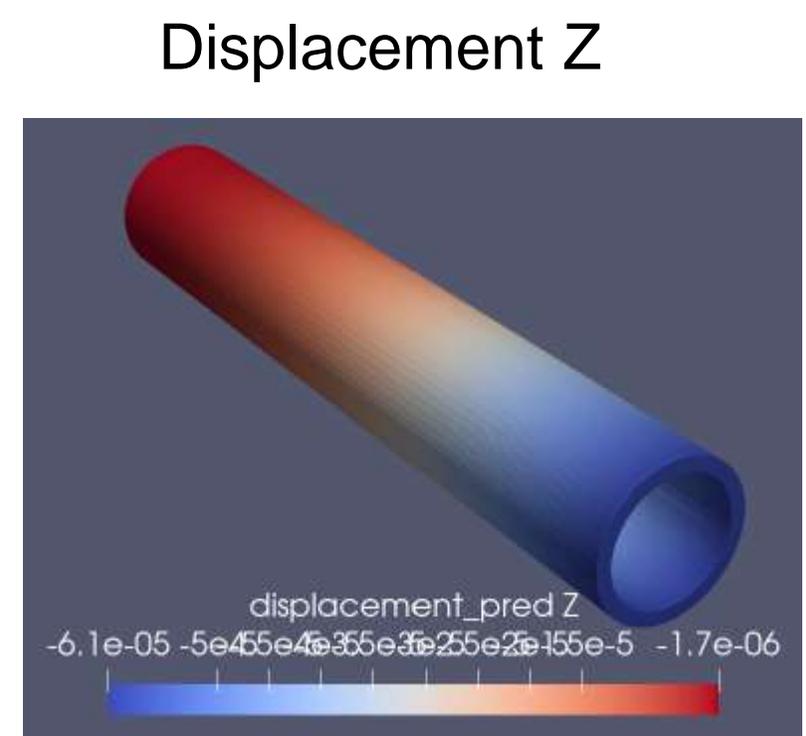
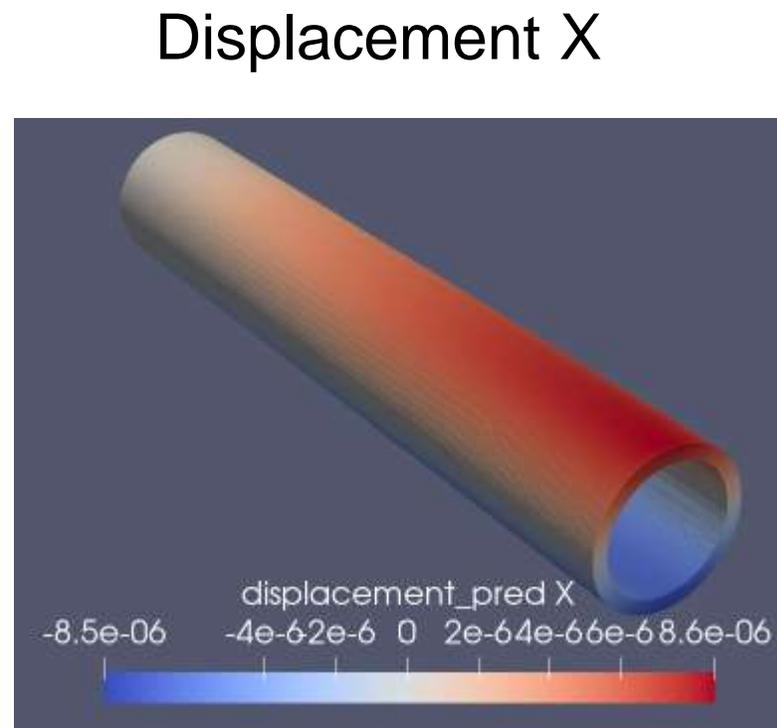
Deformation



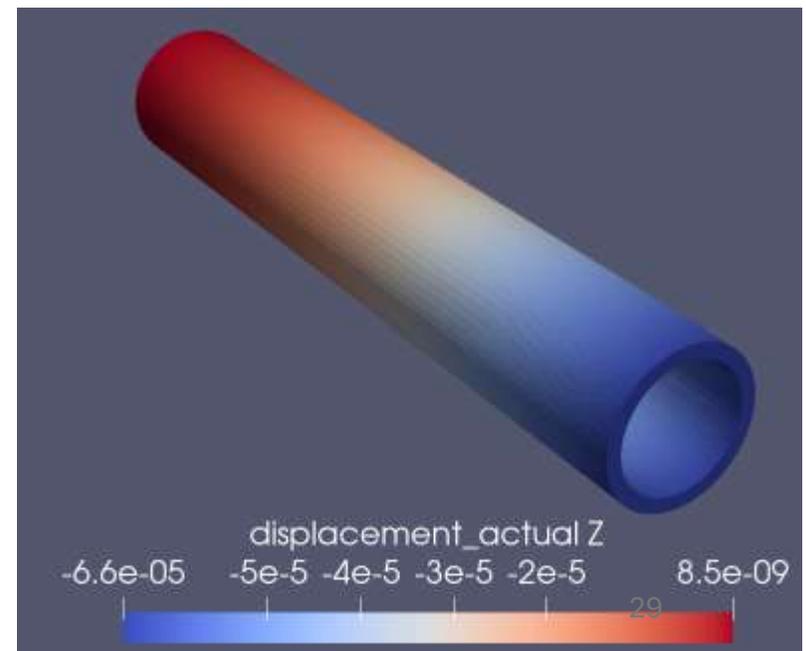
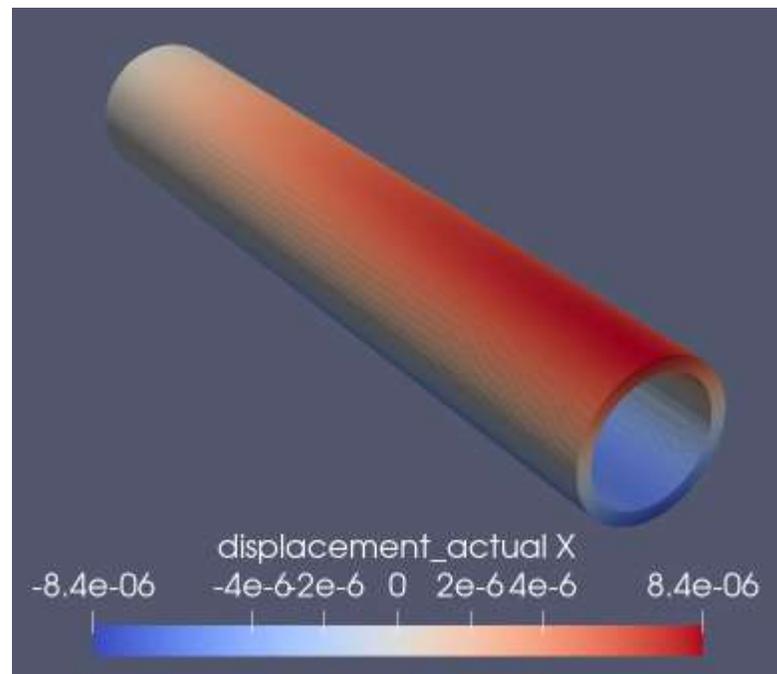
Hollow circular section

- Radius: 8
- Thickness: 1.5
- Length: 90

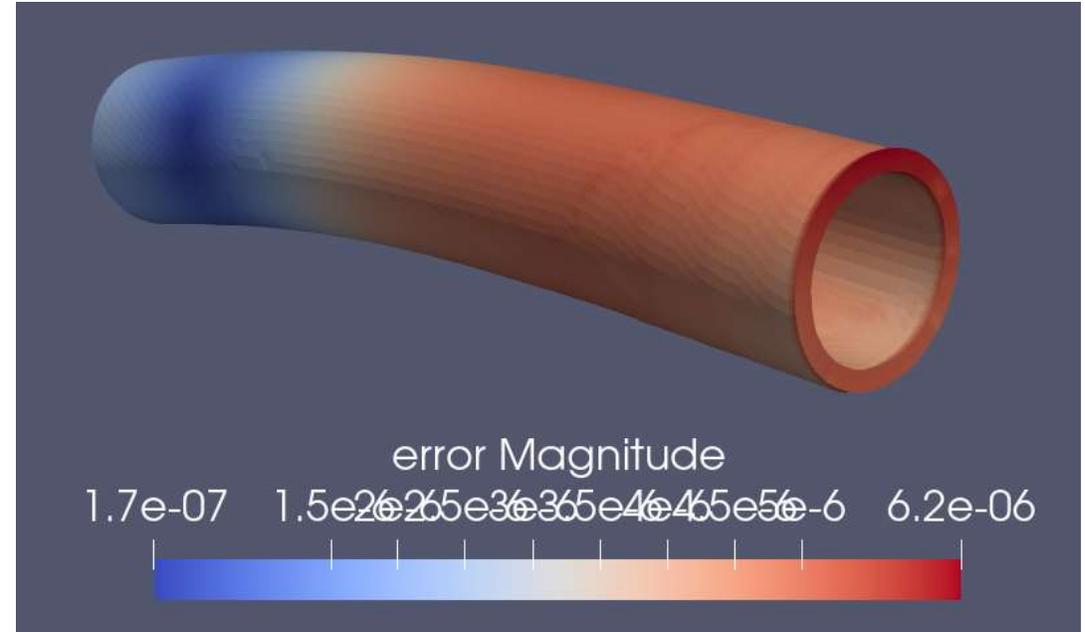
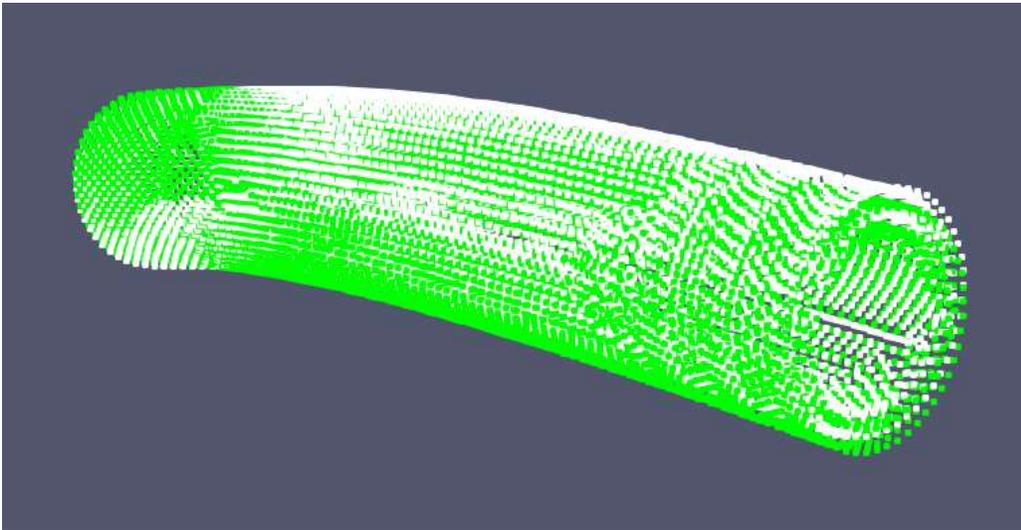
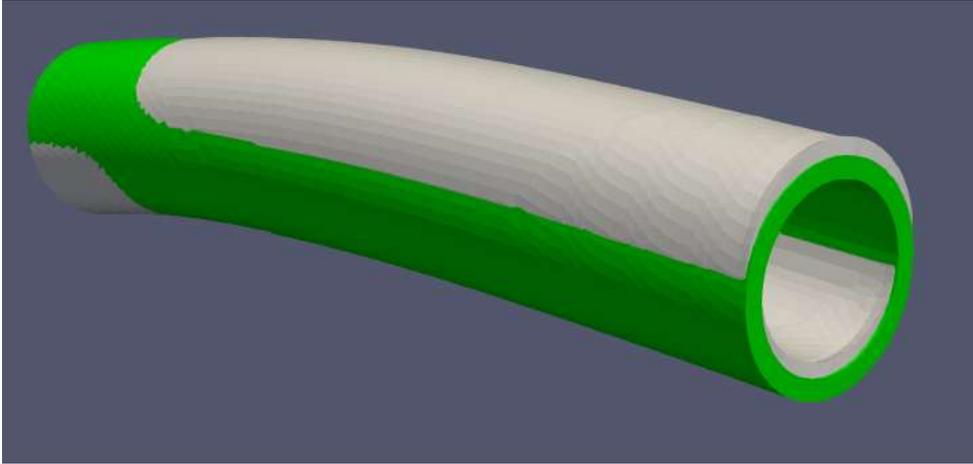
Predict



Actual



Deformation

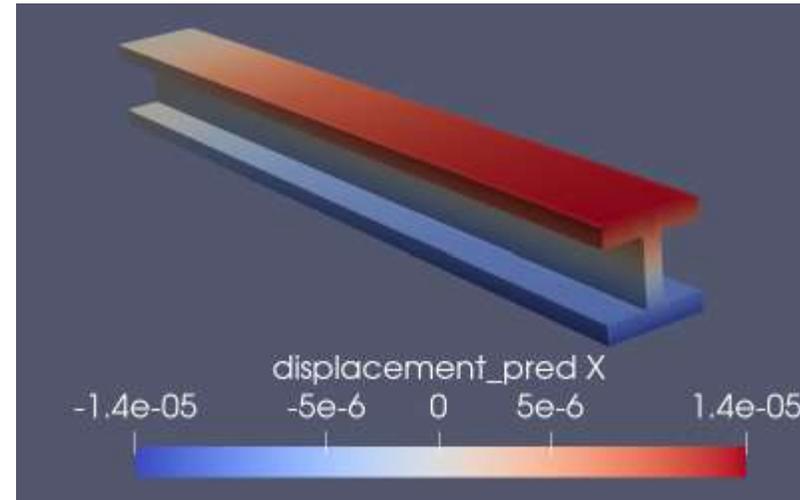


I shape section

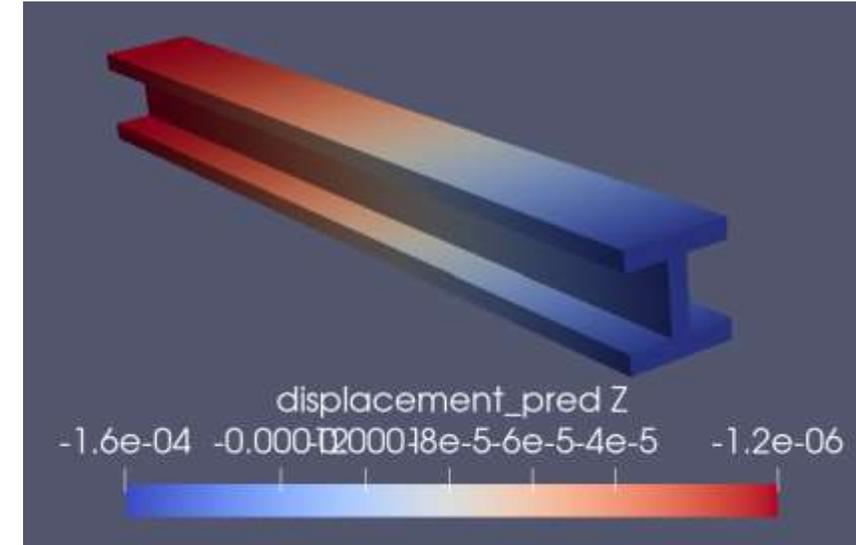
- Height: 11
- w: 11
- t1: 2
- t2: 2
- Length: 100

Predict

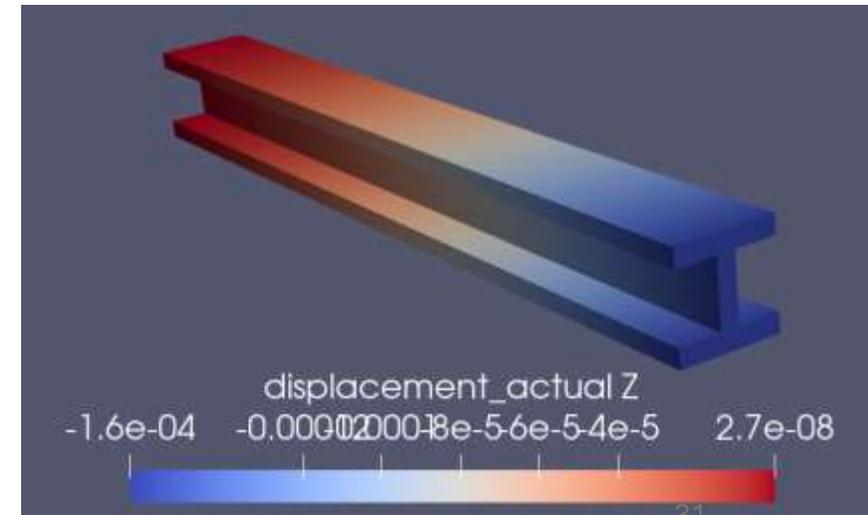
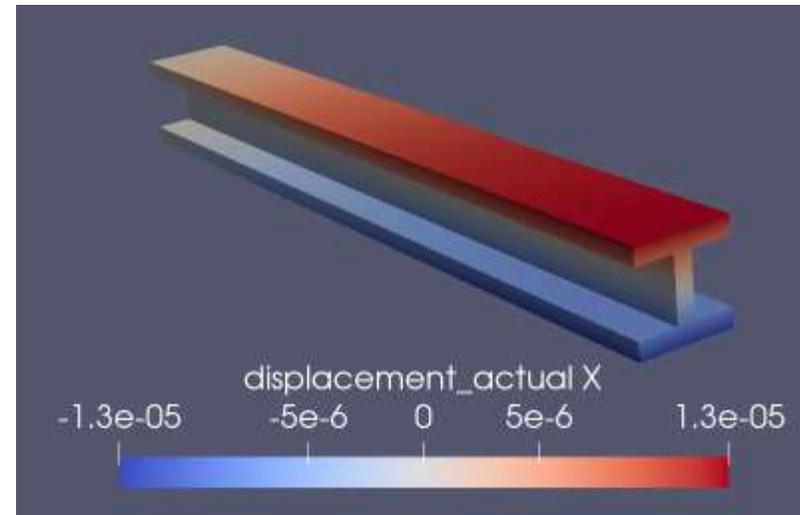
Displacement X



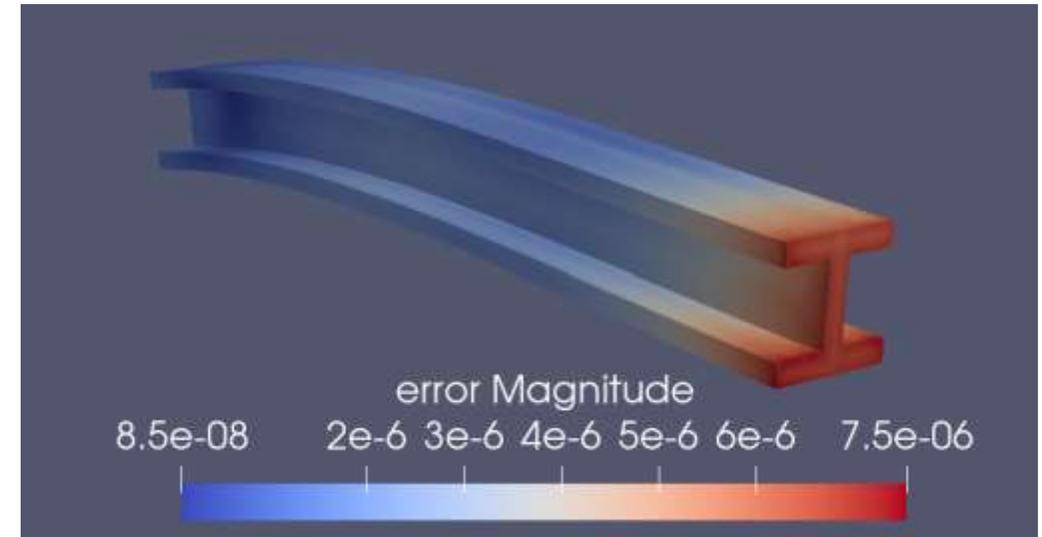
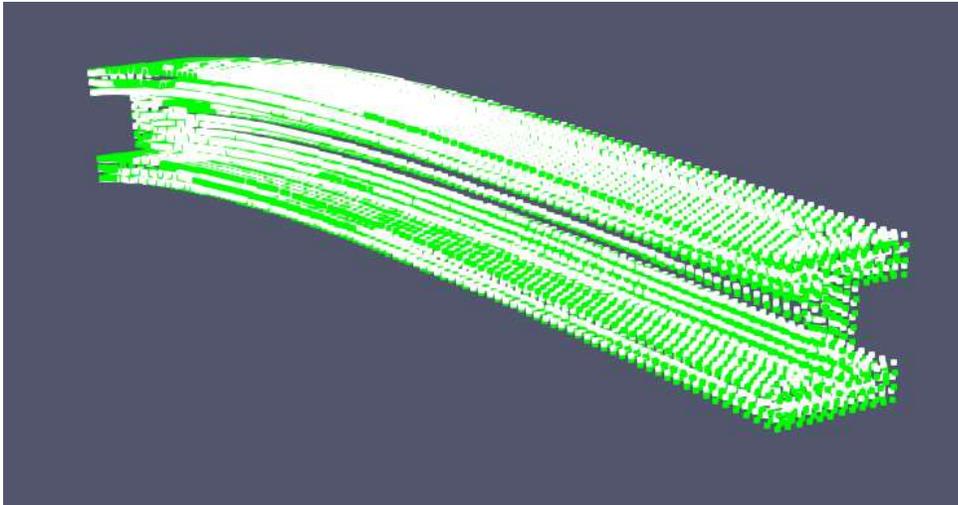
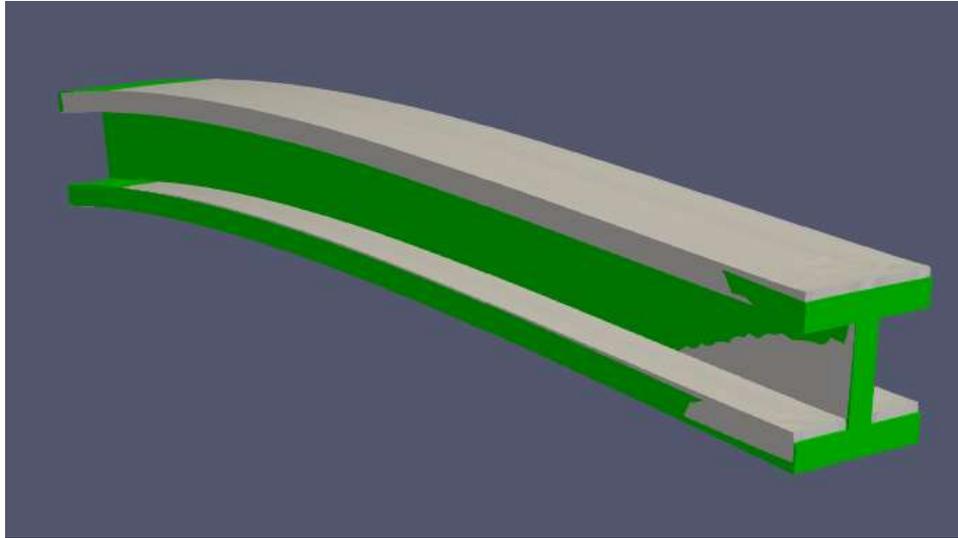
Displacement Z



Actual



Deformation





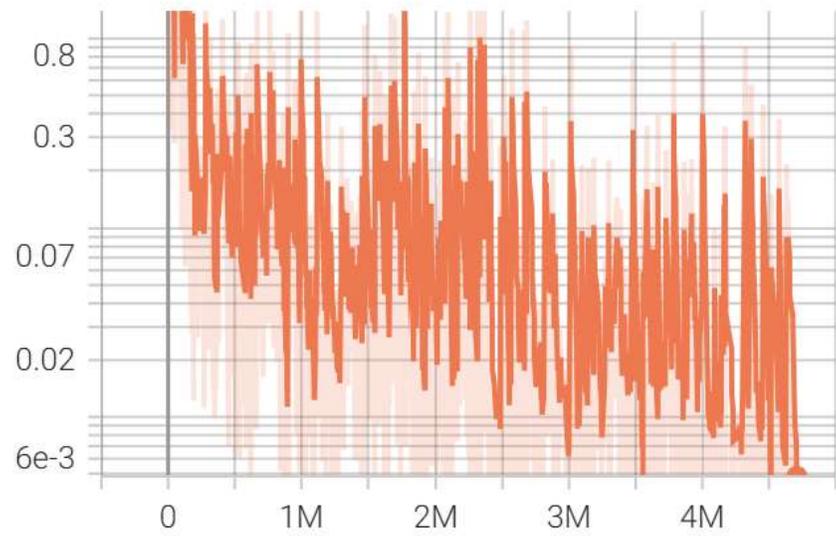
応力類推AIモデル

トレーニング

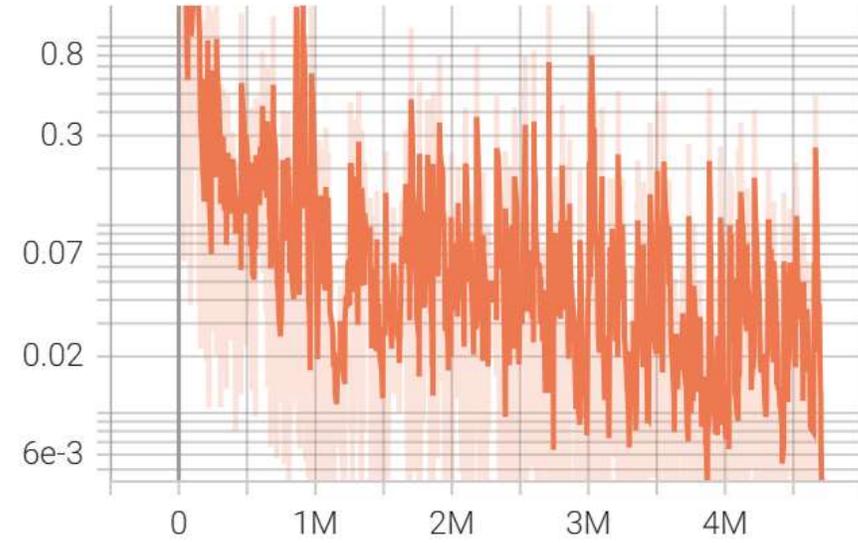
- トレーニング時の損失関数の推移を全体損失（Train loss）、ミーゼス応力（mises）のグラフで示した。また、プロットを各エポックごとに平均化した（※）全体損失を下に示した（35ページ）
- グラフのX軸はイタレーション数であり、すべてのイタレーションの値を用いるとグラフが振動して見えるが、各エポックごとに平均化したグラフは順調に収束している。

※ 1 エポック = 325 イタレーション

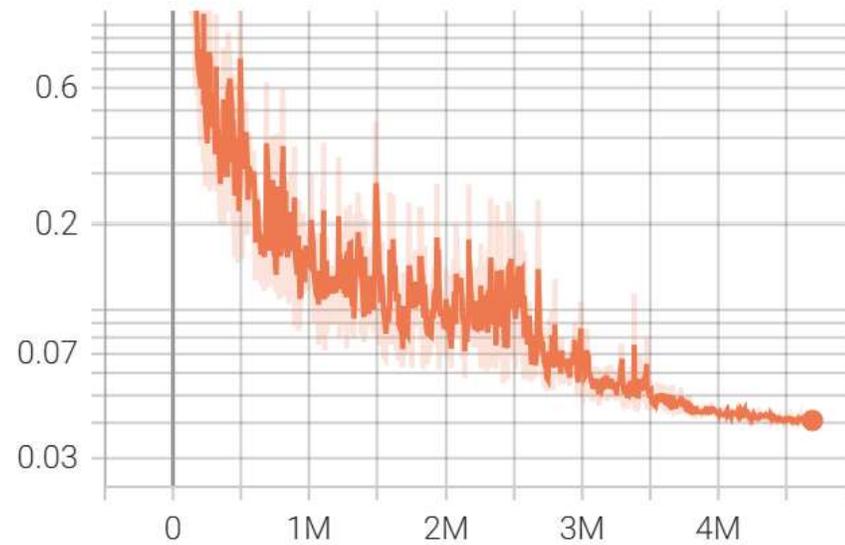
train_loss
tag: train_loss



mises
tag: mises



epoch_train_loss
tag: epoch_train_loss



応力類推結果（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5形状に関して、類推結果を比較した。左端（拘束端）のミーゼス応力最大値について、FEM結果（Actual：参照値）と優れた一致をしている。
- 結果の詳細については、ミーゼス応力コンター図比較を示した。（37ページ以降）

断面形状	ミーゼス応力（参照値）	ミーゼス応力（類推値）	誤差	備考
Rectangular	3.30E+07	3.10E+07	0.06	Height: 15,Width: 10,Length: 120
Hollow rectangular	6.80E+07	6.30E+07	0.07	Height: 10,Width: 15,Thickness: 1.5,Length: 120
Circular	3.00E+07	3.00E+07	0.00	Radius: 7.5,Length: 110
Hollow circular	1.30E+08	1.20E+08	0.08	Radius: 7.5,Thickness: 1,Length: 120
I shape	5.90E+07	5.90E+07	0.00	Height: 12,w: 12,t1: 3,t2: 1.5,Length: 120

Stress Mises

Rectangular section

- Height: 15
- Width: 10
- Length: 120

Predict



Actual



Stress Mises

Hollow rectangular section

- Height: 10
- Width: 15
- Thickness: 1.5
- Length: 120

Predict



Actual



Stress Mises

Circular section

- Radius: 7.5
- Length: 110

Predict



Actual

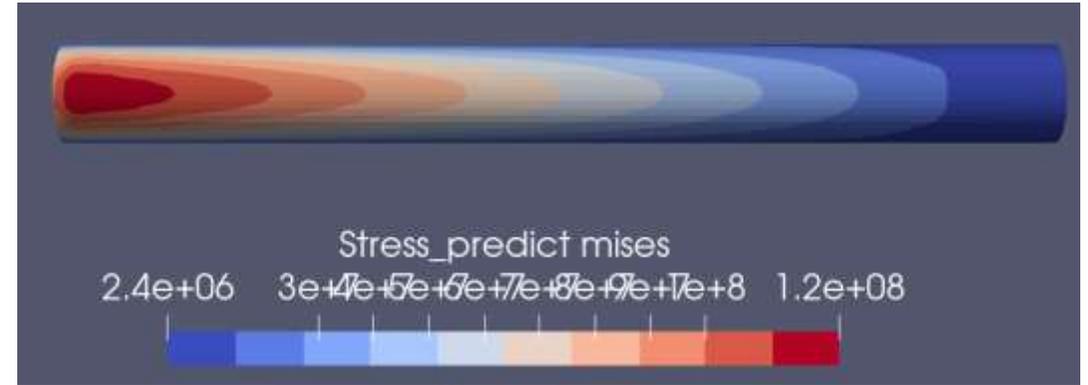
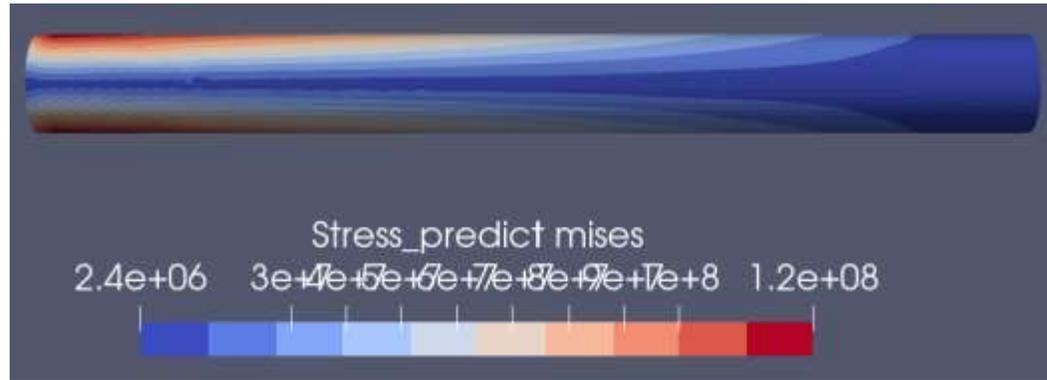


Stress Mises

Hollow circular section

- Radius: 7.5
- Thickness: 1
- Length: 120

Predict



Actual



Stress Mises

I shape section

- Height: 12
- w: 12
- t1: 3
- t2: 1.5
- Length: 120

Predict



Actual



応力類推結果（未知モデル）

- トレーニングしたサロゲートモデルを使い、未知モデルであるトレーニングに使用しない形状寸法における類推結果を検証した。
- 下表の5形状に関して、類推結果を比較した。左端（拘束端）のミーゼス応力最大値について、FEM結果（Actual：参照値）と優れた一致をしている。
- 結果の詳細については、ミーゼス応力コンター図比較を示した。（43ページ以降）

断面形状	ミーゼス応力（参照値）	ミーゼス応力（類推値）	誤差	備考
Rectangular	4.20E+07	4.10E+07	0.02	Height: 11,Width: 13,Length: 115
Hollow rectangular	1.40E+08	1.50E+08	0.07	Height: 10,Width: 5,Thickness: 1,Length: 90
Circular	4.90E+07	4.70E+07	0.04	Radius: 6.5,Length: 115
Hollow circular	3.60E+07	3.40E+07	0.06	Radius: 8,Thickness: 1.5,Length: 90
I shape	3.30E+07	3.70E+07	0.12	Height: 20,w: 12,t1: 1.5,t2: 1.5,Length: 120

Stress Mises

Rectangular section

- Height: 11
- Width: 13
- Length: 115

Predict



Actual

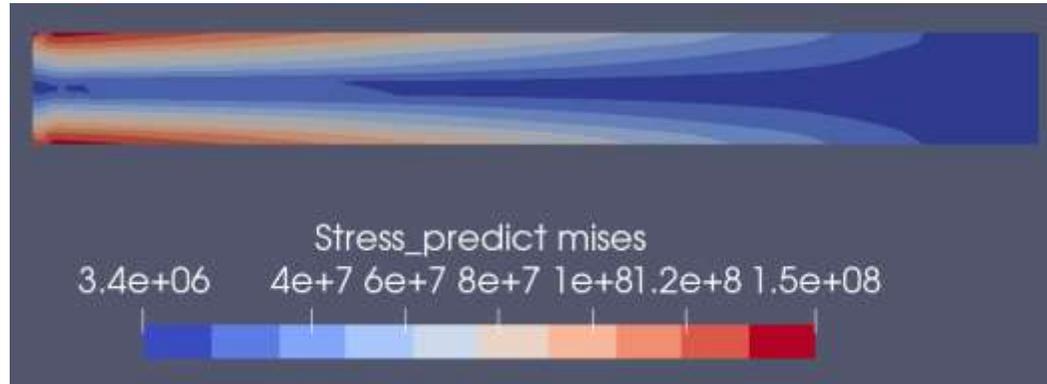


Stress Mises

Hollow rectangular section

- Height: 10
- Width: 5
- Thickness: 1
- Length: 90

Predict



Actual

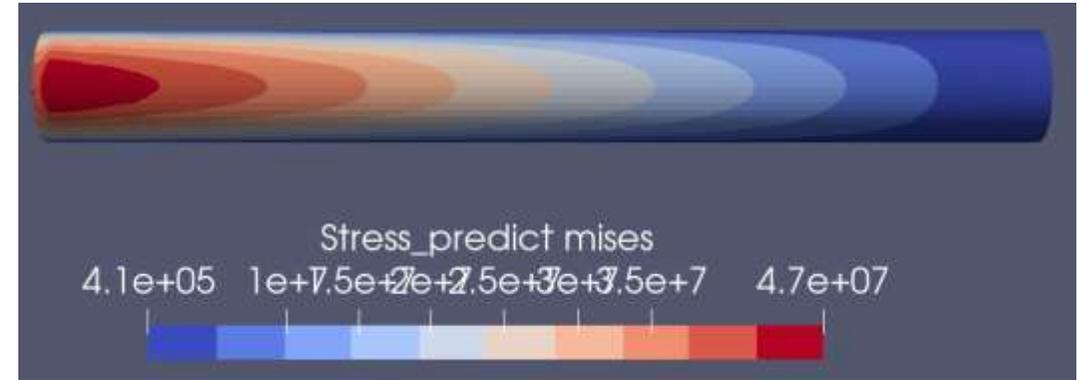


Stress Mises

Circular section

- Radius: 6.5
- Length: 115

Predict



Actual

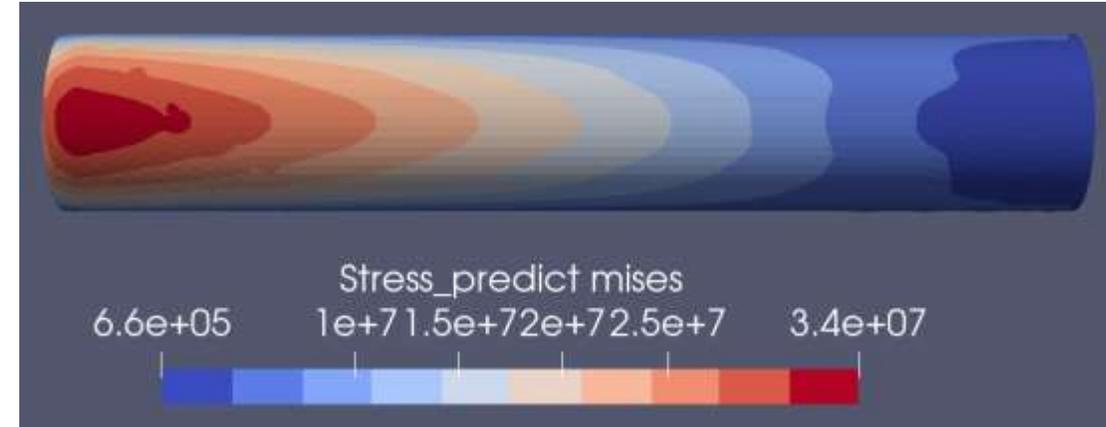


Stress Mises

Hollow circular section

- Radius: 8
- Thickness: 1.5
- Length: 90

Predict



Actual



Stress Mises

I shape section

- Height: 20
- w: 12
- t1: 1.5
- t2: 1.5
- Length: 120

Predict



Actual



まとめ



- AIモデルの類推結果は、変位、応力ともFEM解析結果と良好な一致を見た。また 応力コンター図は、FEM結果と同等以上のスムーズな境界線も観察された。
- トレーニングデータ数は325個であり、以前に同様なGNNサロゲートモデルを作成したときの1/100のデータ数であった。同条件等とは言えないが、PINNsによってトレーニングデータ数を大幅に削減できる可能性を示している。
- 未知データの類推性能には、まだ改善の余地があり、トレーニングデータの網羅性を上げることにより改善されると思われる。
- GCNにおけるPINNsの適用について道筋をつけることができた。



Astra

以上