



2023年9月6日

第4回スーパーコンピュータ「不老」ユーザ会

次世代自動車構造設計のための 3次元形状生成AI構築の試み

名古屋大学 大学院工学研究科 土木工学専攻
構造・材料工学講座 計算力学・最適設計学研究室
准教授 西口 浩司



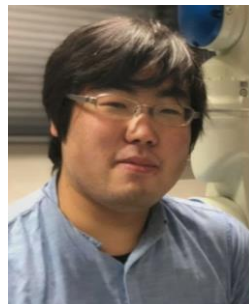
NAGOYA UNIVERSITY

研究メンバー



 名古屋大学

M1 戸井田 一聖 君



東北大学
TOHOKU UNIVERSITY

助教 千葉 直也 先生



東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

助教 和田 有司 先生



Outline

1. 背景と動機
2. データセット生成手法
3. 深層生成モデル
4. 試行計算例
5. まとめと今後の予定

- StableDiffusionのような画像生成AIだけでなく、3次元形状を生成するAIも2022年以降、続々と登場。
- ShapeNet等の3次元形状とテキストのデータセットを、深層生成モデルに学習させたもの。
 - 自然言語・画像・動画に比べて、**3次元形状のデータセットは圧倒的に少ない。**
 - **構造力学的設計に応用可能なデータセットは未だ提案されていない。**

モデル名	発表年月	研究グループ	3D形状表現	モデル・アーキテクチャ	データセット	3Dデータ数
Shap-E	2023年5月	OpenAI	陰関数	Transformerベースの拡散モデル	ShapeNet (3D形状), WebImageText (2D画像)	数百万個
Point-E	2022年12月	OpenAI	3次元点群	Transformerベースの拡散モデル	ShapeNet (3D形状), WebImageText (2D画像)	数百万個
Magic3D	2022年11月	NVIDIA	3Dメッシュ	NeRF, 拡散モデル	COCO (2D画像), ImageNet (2D画像)	なし
DreamFusion	2022年9月	Google, UC Berkeley	陰関数	NeRF, 拡散モデル	COCO (2D画像), ImageNet (2D画像)	なし



Shap-E



Magic3D



ギガキャスティング構造のインパクト

NAGOYA UNIVERSITY

- SpaceX社の冶金技術（アルミニウム）を活用したTesla社のギガキャスティングの登場
 - **質量：30%減，製造コスト：40%減**
- 2022年，NIOやXPeng等の中国を代表するBEVメーカーに加えてボルボ社も，ギガキャスティングの採用を発表。2023年6月，トヨタ自動車もギガキャスティングの採用を発表。
- 幾何学的自由度が高い構造設計が可能
 - トポロジー最適化
 - 線形問題（弾性体の微小変形問題）はほぼ確立されている。
 - 大変形・弾塑性を考慮できる手法は確立されていない。
 - **クラッシュャブル・ゾーン（車体前方部・後方部）の最適構造を探索するのは現状では困難。**



テスラのギガキャスティング構造
(アルミニウム)



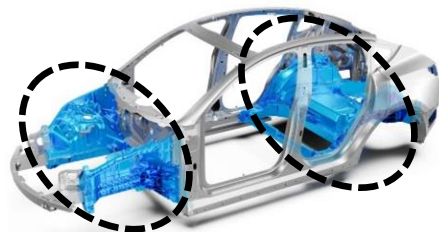
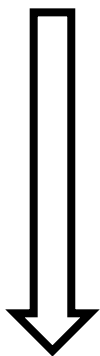
テスラのギガキャスティング装置
(アルミニウムのダイキャスト装置)

<https://lowcarb.style/2022/08/23/tesla-gigapress-giga-texas/>

<https://thelastdriverlicenseholder.com/2022/04/20/tesla-revenue-grows-81-percent-in-q1-2022/>

研究の動機

巨大アルミダイカストによる自動車構造の革新



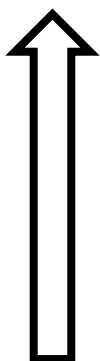
質量：30%減， 製造コスト：40%減



ギガプレス（テスラ）



深層生成モデル（Parameter-to-3D）によって最適構造を生成することは可能か？



Magic3D（NVIDIA, 2022年11月）



Shap-E（OpenAI, 2023年5月）

3次元形状生成AIの急速な発展

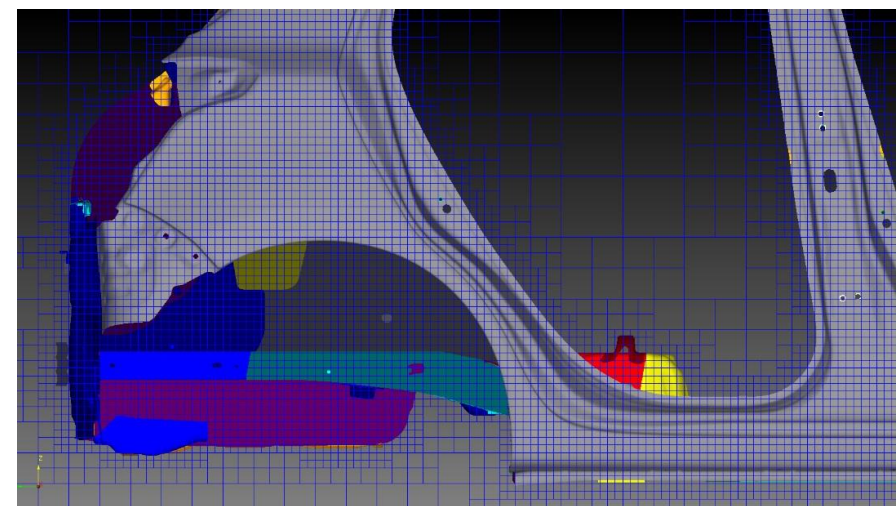
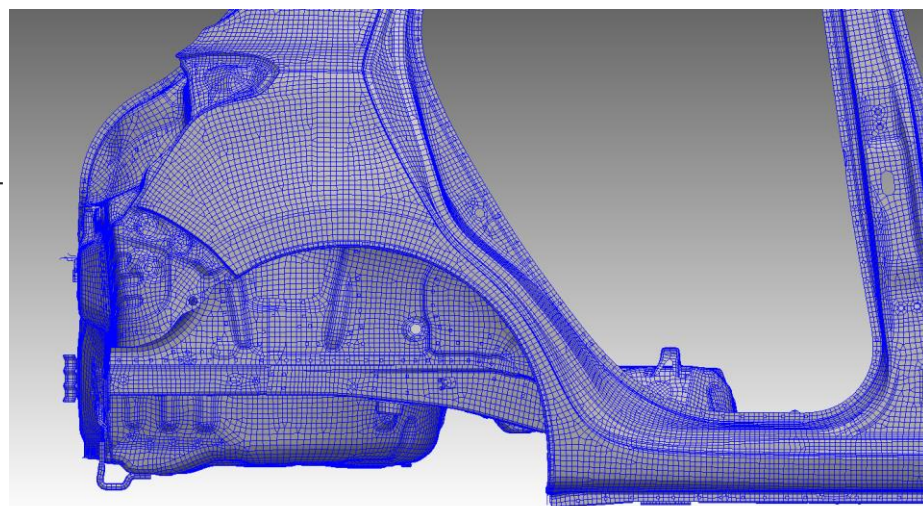


Outline

1. 背景と動機
2. データセット生成手法
3. 深層生成モデル
4. 試行計算例
5. まとめと今後の予定

固定直交メッシュ法（オイラー型解法）

	Conventional FEM	Eulerian FVM
Mesh generation	lots of time and effort to generate a mesh	Easy and fast to generate a mesh
Large deformation	Mesh distortion can be occurred	Mesh distortion cannot occurred



K. Nishiguchi, et al. "Eulerian finite volume formulation using Lagrangian marker particles for incompressible fluid-structure interaction problems." International Journal for Numerical Methods in Engineering 123.5 (2022): 1294-1328.
 西口浩司, et al. "ラグランジュマーカー粒子を用いたオイラー型有限体積法による圧縮性固体解析." 土木学会論文集 A2 (応用力学) 75.2 (2019): I_237-I_248.

Building-cube method

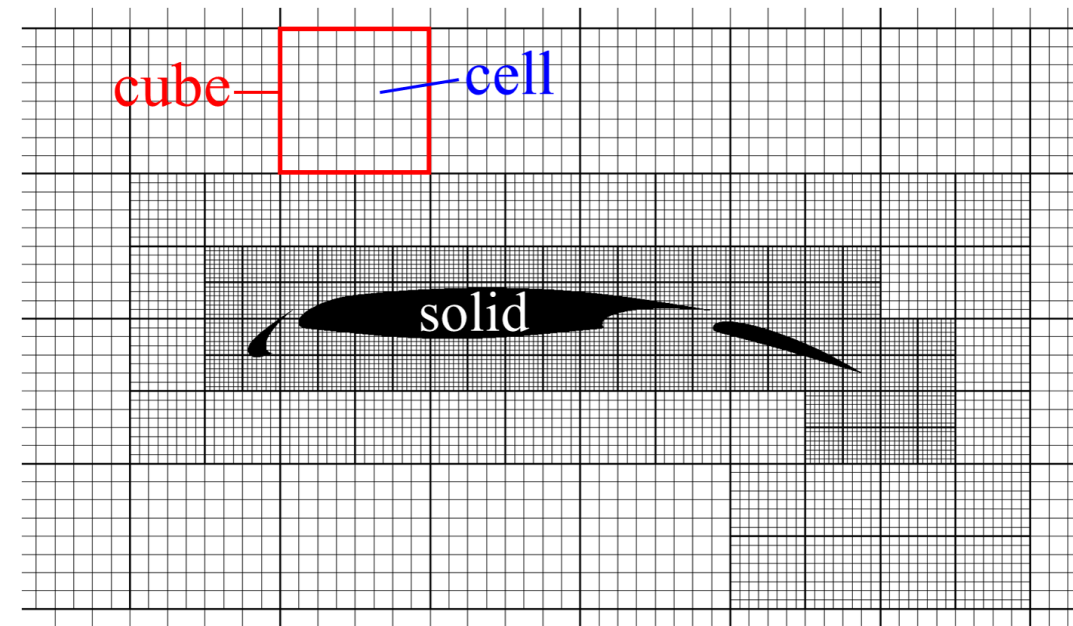
Hierarchical Cartesian mesh method

- Divide the computational domain into cubic regions called “cubes”
- Divide the each cube into an equal number of computational cells
- Allocate the same number of cubes to each computational core
- Loop processing is performed within each cube

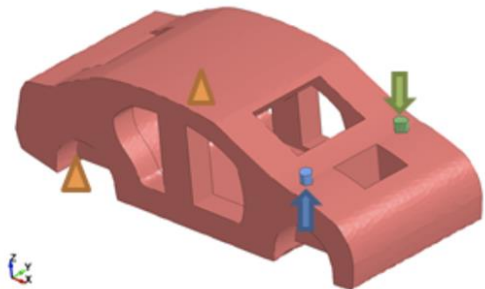


High parallel efficiency

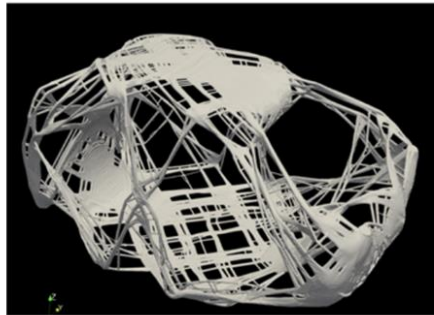
- Uniform computational load
- Continuous and local memory access



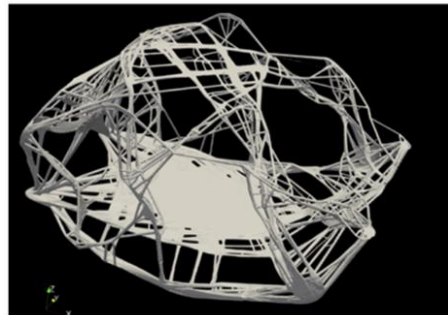
設計領域・荷重条件



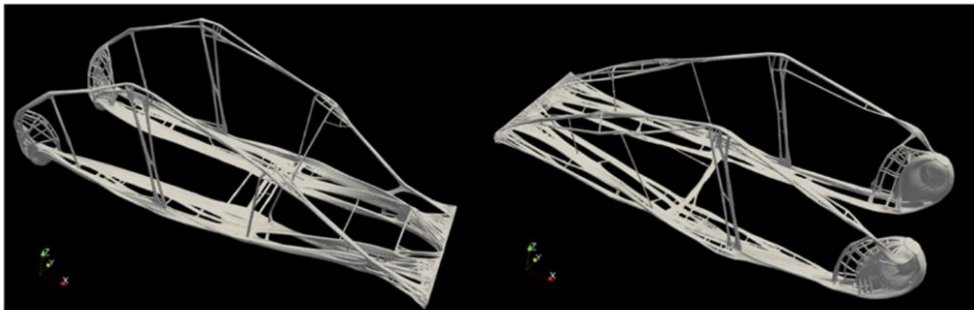
ねじり荷重の場合



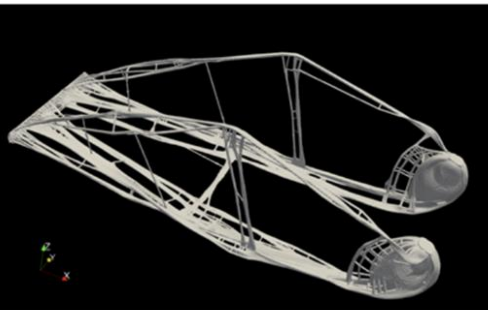
曲げ荷重の場合



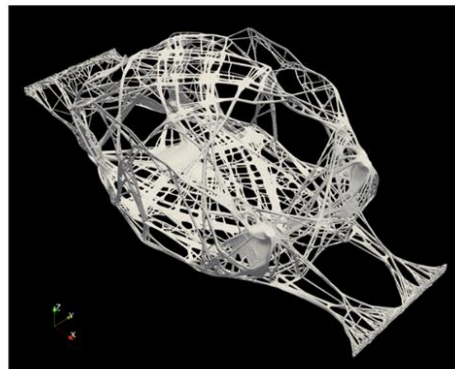
フロントに荷重を作用させた場合



リアに荷重を作用させた場合



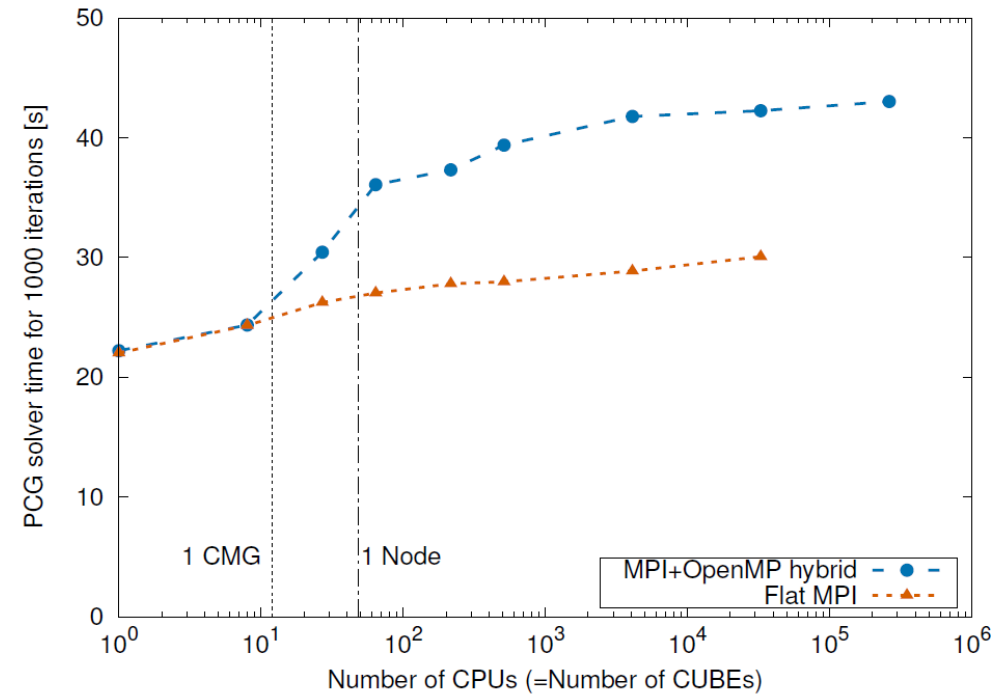
4条件の複合最適化



Computational mesh

- Number of cubes: 34744
- Number of cells: 1.42億
- Minimum cell size: 5 mm

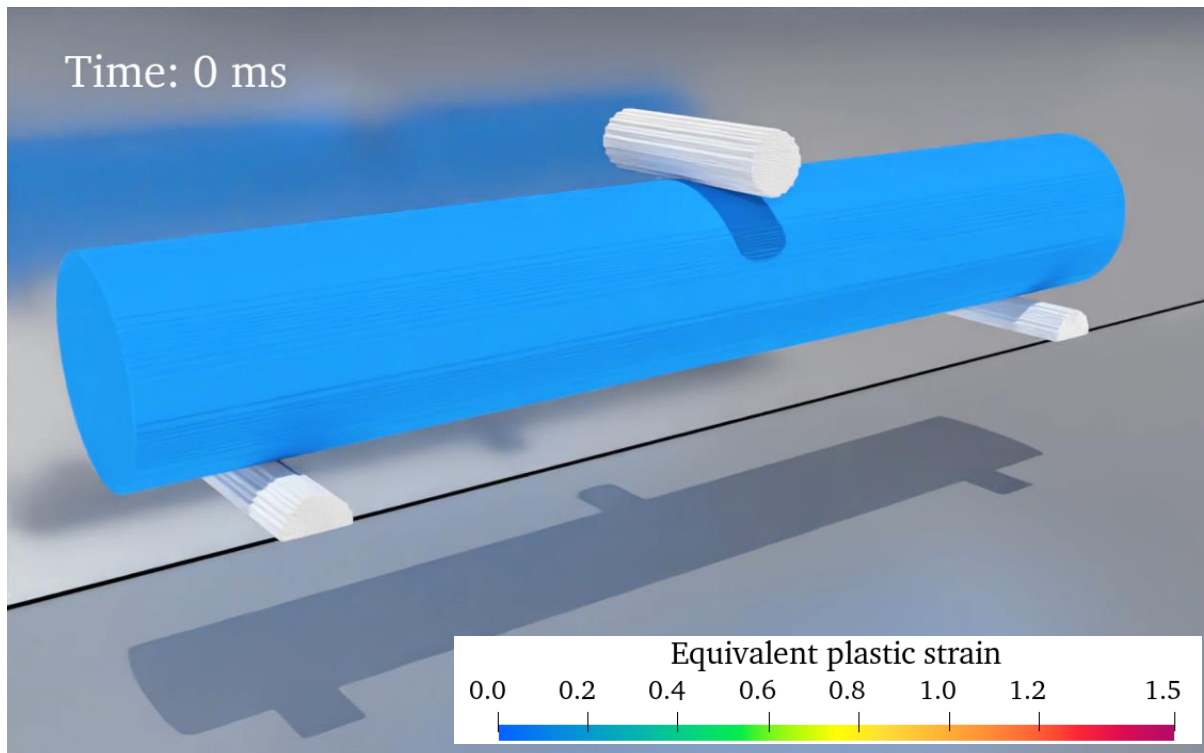
WADA, Yuji, et al. Billion-design-variable-scale topology optimization of vehicle frame structure in multiple-load case. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2023, 09544070231184309.



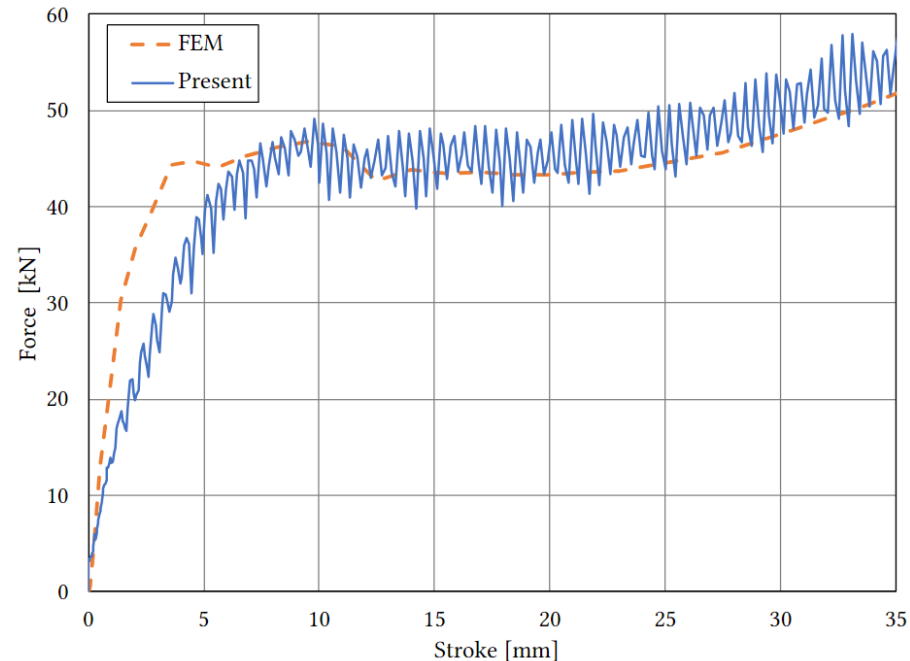
ウィーク・スケーリング@富岳

弾塑性解析 (非線形領域のパラメータ取得)

By 名古屋大学 M2 竹内 秀輔, 2023



荷重-変位曲線の比較



ウィーク・スケーリング@富岳

コア数	ノード数	core/node	セル数	実行時間[s]	スケーリング
2048	64	32	8,388,608	17.27	100.0%
16384	512	32	67,108,864	20.13	85.8%
131072	4096	32	536,870,912	23.50	73.5%

Computational mesh

- Number of cubes: 2,560
- Number of cells: 10,485,760
- Minimum cell size: 0.468 mm

Parallel computation

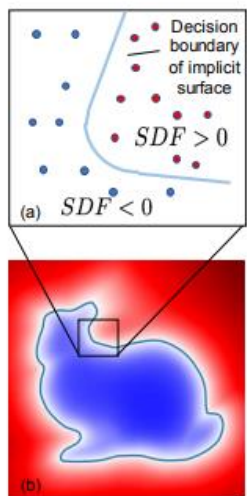
- Hardware: Supercomputer Fugaku
- Node: 80
- MPI Rank: 320
- OpenMP thread: 8
- Total cores: 2560



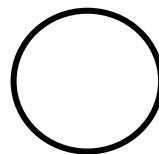
Outline

1. 背景と動機
2. データセット生成手法
- 3. 深層生成モデル**
4. 試行計算例
5. 今後の展開

- 3次元形状を陰関数で表現
 - ボクセル, 点群よりメモリ消費が少ない
- 確率的オートデコーダによる3次元形状学習



SDF(距離符号関数)



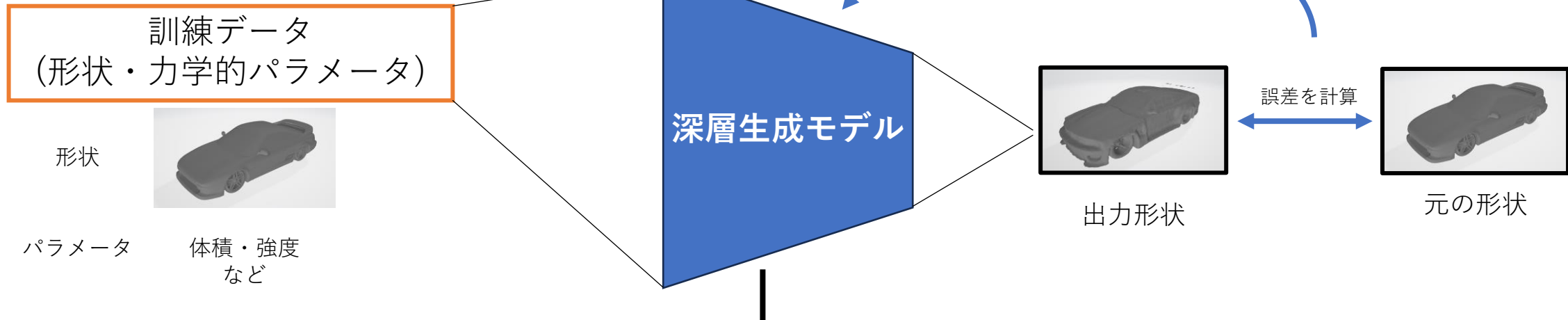
$$x^2 + y^2 = 0$$



$$f(x) = ?$$

DeepSDFに基づく深層生成モデル

訓練時



再構築時





Outline

1. 背景と動機
2. データセット生成手法
3. 深層生成モデル
4. **試行計算例**
5. まとめと今後の予定



計算条件（「不老」Type I を利用）

トポロジー最適化

- ◆ Cube数：512
- ◆ セル数：2,097,152

- ◆ 材料物性値：
アルミを想定
密度：2900kg/m³
ヤング率：70GPa
ポアソン比：0.3

- ◆ 材料モデル：弾塑性体
- ◆ トポロジー最適化のステップ数：50
- ◆ 実行時間：1800s
- ◆ 並列数：8 threads × 4 ranks × 16 node
- ◆ 目的関数：

find: ρ_j , Minimize: $\Omega = \mathbf{u} \cdot \mathbf{f}$

Subject to: $\int \rho_j d\Omega_j \leq V_0, \quad \sum_j [k_j] \mathbf{u} = \mathbf{f}$

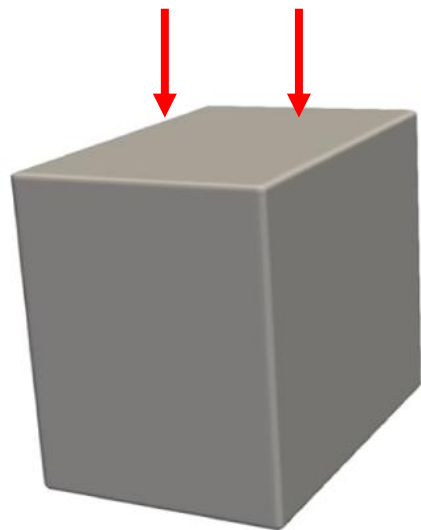
弾塑性解析

- ◆ Cube数：512
- ◆ セル数：2,097,152

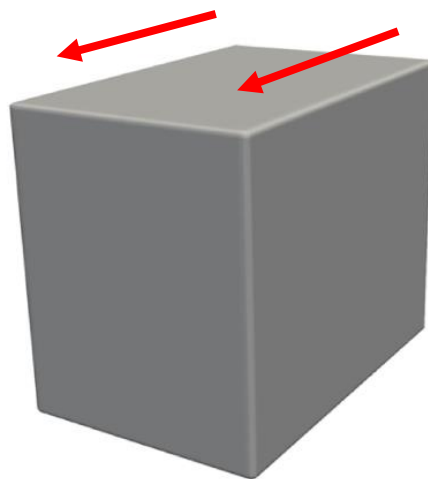
- ◆ 材料物性値：
アルミを想定
密度：2900kg/m³
ヤング率：70GPa
ポアソン比：0.3

- ◆ 材料モデル：弾塑性体
- ◆ 順解析のステップ数：1
- ◆ 実行時間：10800s
- ◆ 並列数：8 threads × 4 ranks × 16 node
- ◆ 荷重条件：zマイナス方向(圧縮)
- ◆ 境界条件：トポロジー最適化と同一

線形範囲のデータセット生成



トポロジー最適化



トポロジー最適化

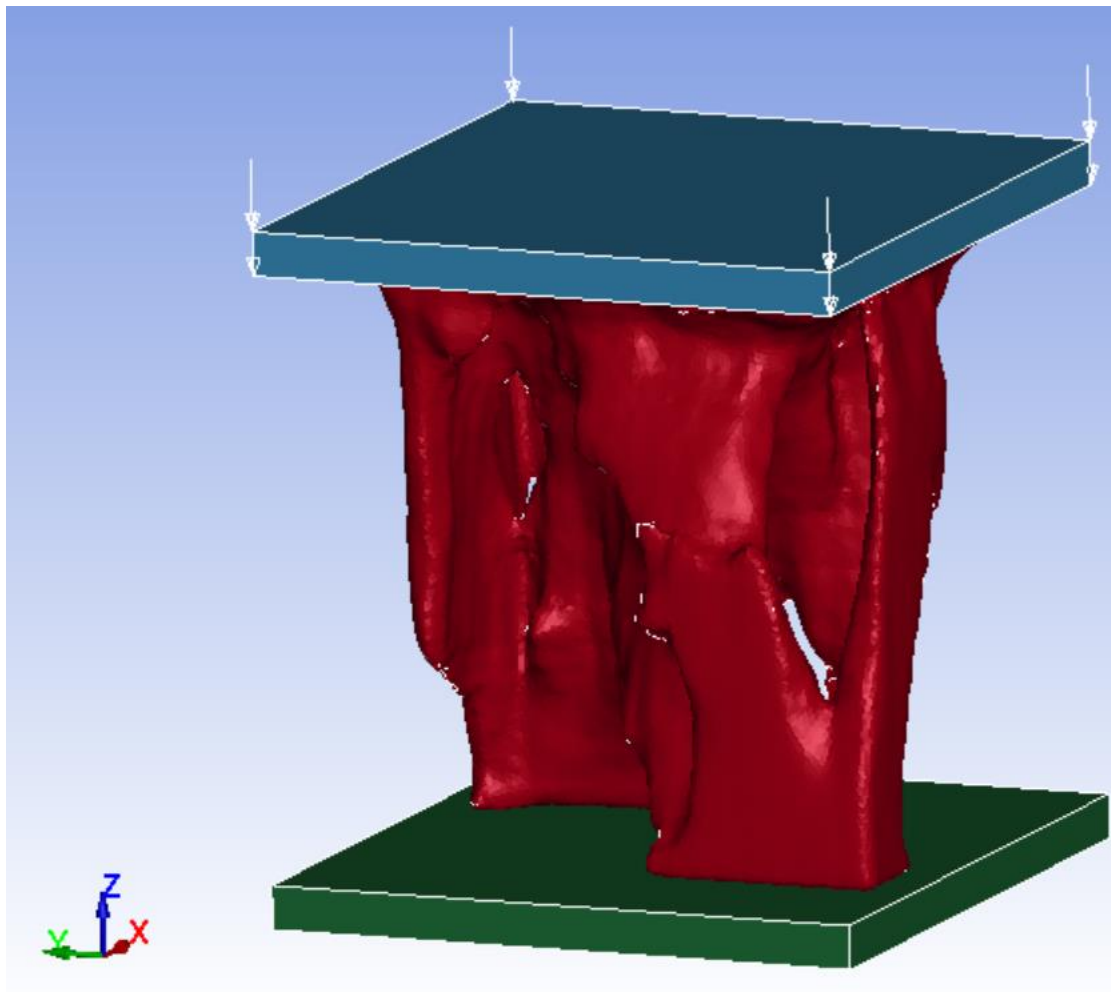


荷重の向きを変えることで
作られる形状が変化



500ケース形状データ作成

非線形範囲のデータセット生成



- ◆ Cube数 : 512
- ◆ セル数 : 2,097,152
- ◆ 材料物性値 :
 - アルミを想定
 - 密度 : 2900kg/m³
 - ヤング率 : 70GPa
 - ポアソン比 : 0.3
- ◆ 材料モデル : 弾塑性体
- ◆ 順解析のステップ数 : 1
- ◆ 実行時間 : 10800s
- ◆ 並列数 : 8 threads × 4 ranks × 16 node
- ◆ 荷重条件 : zマイナス方向(圧縮)
- ◆ 境界条件 : トポロジー最適化と同一

非線形範囲のデータセット生成

線形範囲での力学的パラメータ

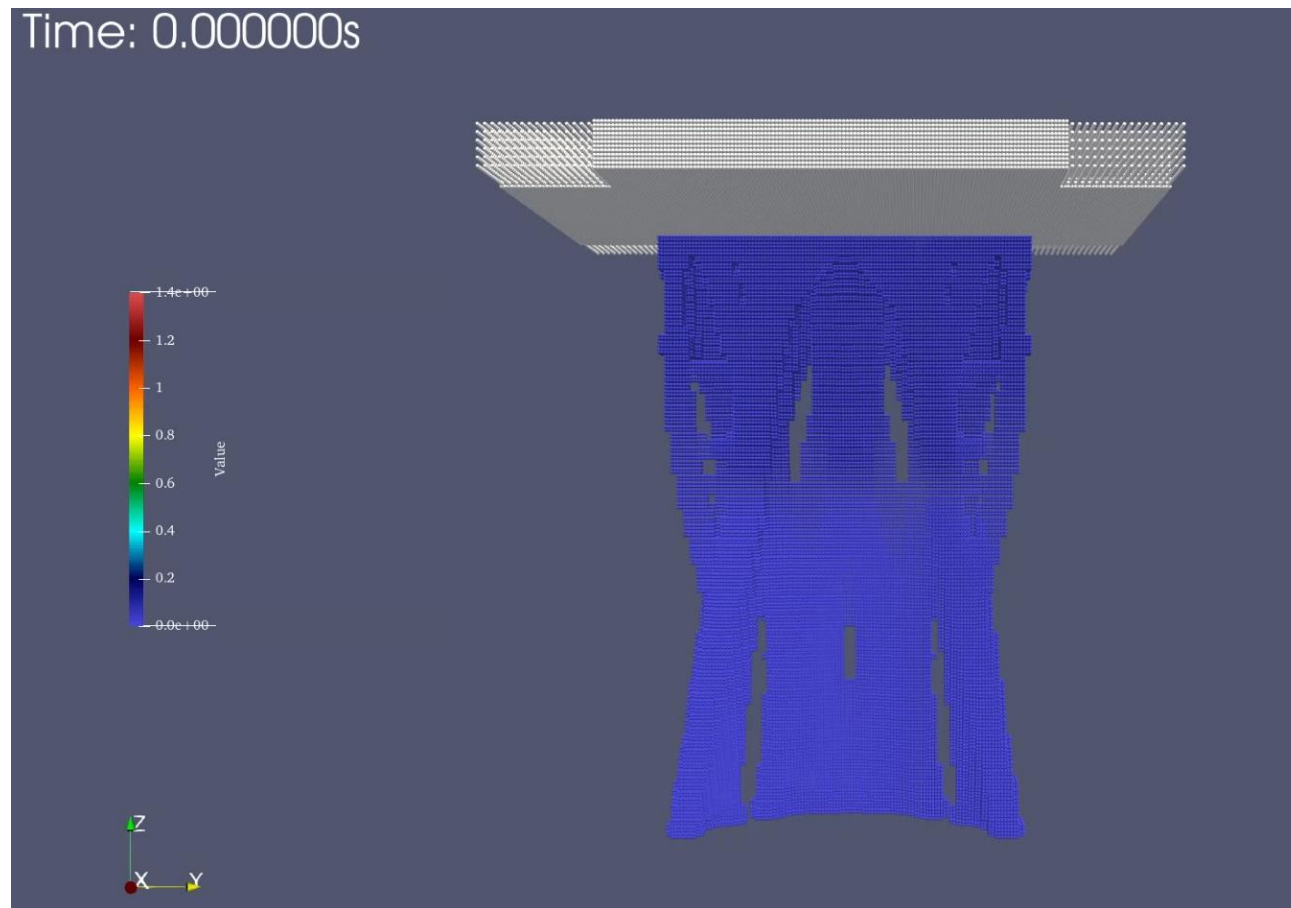
- 質量
- 体積
- 剛性(線形範囲)
- ひずみエネルギー(線形範囲)..ect

非線形範囲での力学的パラメータ

- 強度(非線形範囲)
- ひずみエネルギー(非線形範囲)..ect



まずは線形範囲で得られる力学的パラメータを
形状データに付与して学習を実施



秒速20m/sで衝突解析
ひずみ(変形量)を可視化

深層生成モデルの訓練



名古屋大学 スパコン「不老 type II」

- ◆ 使用ハード：不老Type II
- ◆ GPU：1/4ノード

スパコン「不老」で行ったこと：

- 500ケースの形状・力学的パラメータのペアデータセット作成
- 深層学習モデルの訓練実施(500epoch, 約6時間)

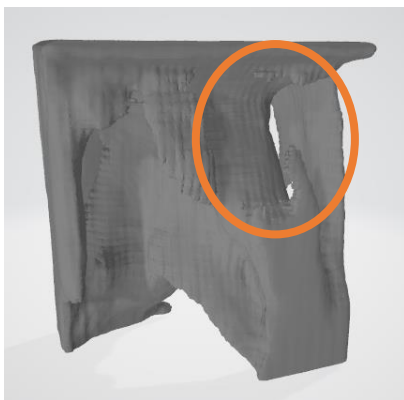


再構築時、**力学的パラメータ(ひずみエネルギー)**を変更
→出力形状にどれほど変化が生まれるか
→出力形状が所定の性能を満たしているか(今後実施予定)

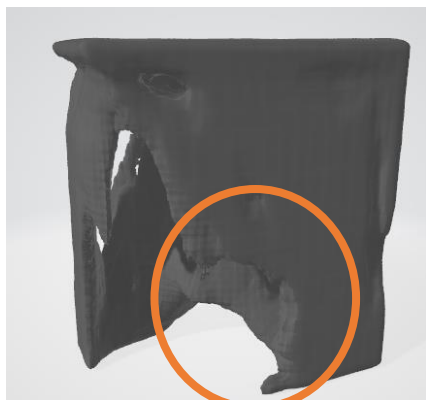
3次元形状の生成例

指定した力学的パラメータ：ひずみエネルギー($\text{N} \cdot \text{m}^2$)

ひずみエネルギー： 1.57×10^{-10}

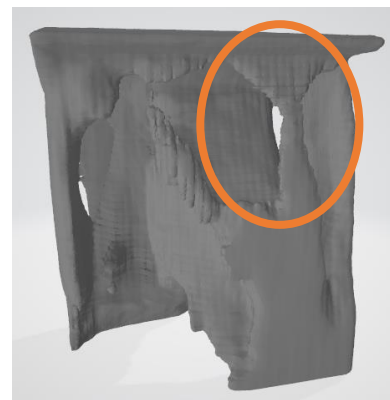


正面



背面

ひずみエネルギー： 5.25×10^{-9}



正面



背面

- ひずみエネルギーを指定することで、3次元形状を生成できることを確認
- 指定するひずみエネルギーを増加させると、ひずみを受け持つ構造が追加され（上図○領域）、定性的には力学的合理性のある3次元形状の生成が行えることを確認した。



Outline

1. 背景と動機
2. データセット生成手法
3. 深層生成モデル
4. 試行計算例
5. まとめと今後の予定

まとめと今後の予定

• まとめ

- DeepSDFに基づく深層生成モデルで、力学的パラメータから3次元形状を生成できる見通しが立った。
- 力学的合理性のある3次元形状を生成できているか否かの定量的検証が必要。

• 今後の予定

- 衝撃吸収構造部材に特化し、1万個を目途にデータセットを生成
- DNNアーキテクチャの差異の調査（FFNN, Transformer等）
- 力学的パラメータから生成された3次元形状の検証
 - 「富岳」一般課題（重点課題）「次世代自動車設計のためのコンポーネント構造の超多ケース弾塑性解析と確率的深層生成モデルへの展開」（課題番号：hp230296, 研究課題代表者：西口浩司, 11,687,500ノード時間, 令和5年度下期～令和6年度上期）の計算資源で推進予定
- 大規模言語モデル（GPT-Fugaku）を用いた条件付き生成手法の検討



謝辞

NAGOYA UNIVERSITY

本研究は以下の計算資源により実施しました。ここに記して感謝申し上げます。

- 令和4年度B期「富岳」利用研究課題（課題番号：hp22024，次世代自動車設計のためのコンポーネント構造の大変形・破断を伴う弾塑性解析，2022年10月～2023年9月，代表者：西口浩司）
- JSPS科研費22H00226により購入したスーパーコンピュータ「不老」の計算資源