

2022.02.15

大阪府立大学 卒業論文発表会

動的・静的混合解法による金属積層造形時の 残留応力に関する検討

Dynamic-Static Mixed Analysis Method for Prediction of Residual Stress due to 3-Dimensional Additive Manufacturing Process

大阪府立大学 工学域
海洋システム工学課程
生島研究室 B4 九鬼正治
(指導教員 : 生島一樹)₁

研究背景・目的

研究背景

金属3Dプリンターとは

レーザー・電子ビームなどの高エネルギー密度の熱源を用いて、金属粉末を溶融・凝固させ、積層を繰り返すことで造形する技術、様々な業界で注目

特長

複雑形状の造形
複数の材料組織
少量多品種生産

実例

航空宇宙産業、金型産業
自動車産業、医療産業...

問題点

造形後の割れを引き起こす原因となる**残留応力**が問題

研究目的

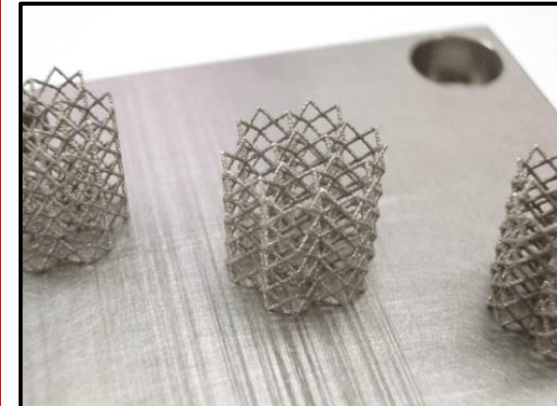
現状

- 先行研究では**残留応力**の検討についてあまりなされていない
- 既存の解析手法では計算時間が膨大で実用的でない

本研究

- **残留応力**の可視化を提案手法である**動的・静的混合解法**を用いて試みる
- 提案手法の性質の検討と加工パラメータが**残留応力**に及ぼすの影響の検討を行う

加工事例



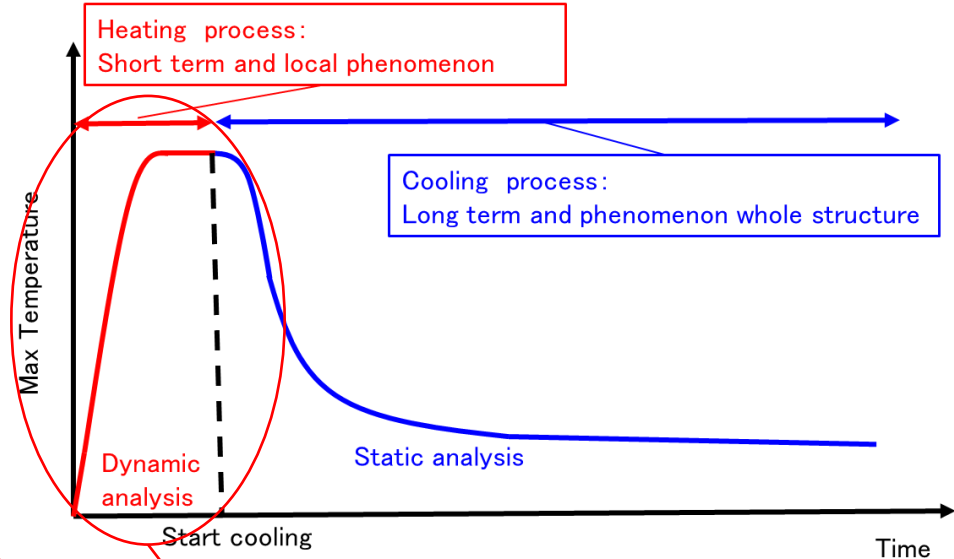
メッシュ構造

松浦機械製作所HPより引用

動的・静的混合解法の概要

従来の熱弾塑性解析では静的陰解法
→ 過渡現象では要素数に応じて
解析時間が膨大に

動的・静的混合解法



開始

メッシュの構築

入熱分布の計算

加熱時熱伝導解析

加熱時熱弾塑性解析

加熱終了

積層後冷却時熱伝導解析

積層後冷却時熱弾塑性解析

冷却終了

積層完了

終了

陽解法

動的陽解法

陰解法

静的陰解法

短期間・局所的な加熱過程
を陽解法を用いて解析

冷却過程では全体現象で
長期間の解析なので
陰解法を用いる

陽解法・陰解法に分ける
ことで大幅な計算時
間の短縮が期待

従来の解析との比較

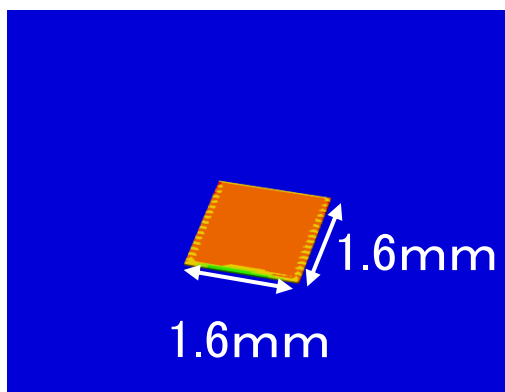
従来の静的陰解法

寸法: 1.6mm × 1.6mm × 30 μ m

要素数: 4,096要素

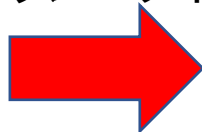
(64 × 64分割、1層分積層)

ステップ数: 13,361step



解析時間: 約26時間

同じメッシュサイズで



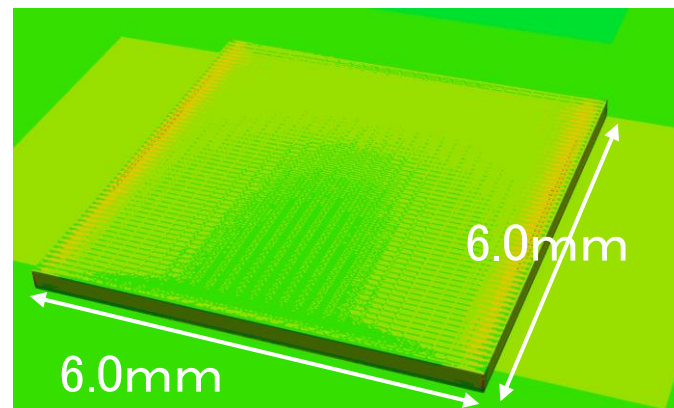
動的・静的混合解法

寸法: 6.0mm × 6.0mm × 300 μ m

要素数: **576,000**要素

(240 × 240分割、10層分積層)

ステップ数: 900,638step



解析時間: **約6時間**

約140倍の要素数のモデルの解析を
1/4の時間で解析
高速な解析が期待できる

提案手法の性質に関する検討

- ダンピング係数
- 時間増分
- メッシュサイズ

解析条件・検討項目とその目的

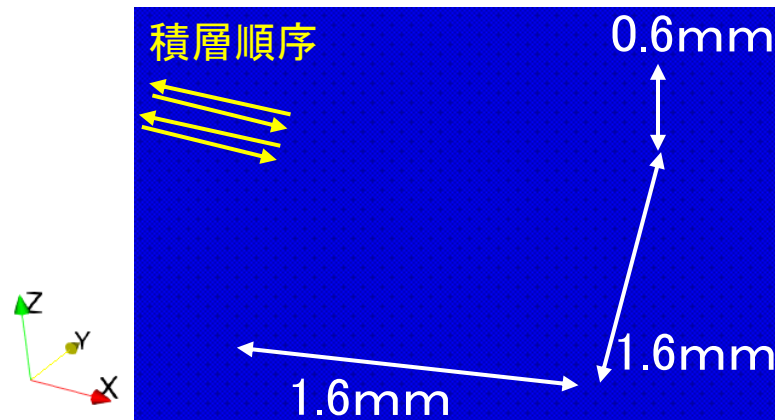
目的: 析検討項目の特徴を整理を行う

解析条件

出力 (W)	140
積層速度 (mm/s)	800
レーザー半径 (μm)	25

材料はSUS316Lを仮定

本解析での積層構造物



ダンピング係数

動的陽解法の運動方程式

$$M^{t+\Delta t} \ddot{U} + C^{t+\Delta t} \dot{U} + K^{t+\Delta t} U = F^{t+\Delta t}$$

ダンピング係数

減衰力の大きさを構造物のひずみや応力の大きさに影響

解析が安定する条件を探す

ダンピング係数を変えて残留応力分布の検討をする

時間増分

時間増分は解析時間と解析精度に影響

時間増分	小さい	大きい
解析時間	大	小
解析精度	良	悪(発散)

解析精度を担保しつつ時間増分は大きいのが望ましい

時間増分を変えて残留応力分布の検討をする

メッシュサイズ

メッシュサイズは要素数に関係
解析時間とデータ容量
解析精度に影響

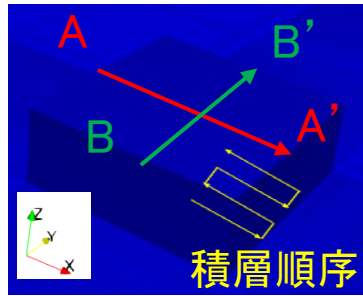
サイズ	小さい	大きい
解析時間	大	小
解析容量	大	小
解析精度	良	悪

大きなメッシュで精度がよいものが望ましい

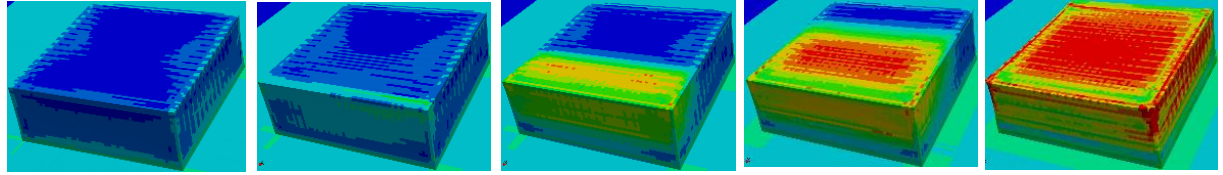
メッシュサイズを変えて残留応力分布の検討をする

ダンピング係数Cの解析結果の比較・検討

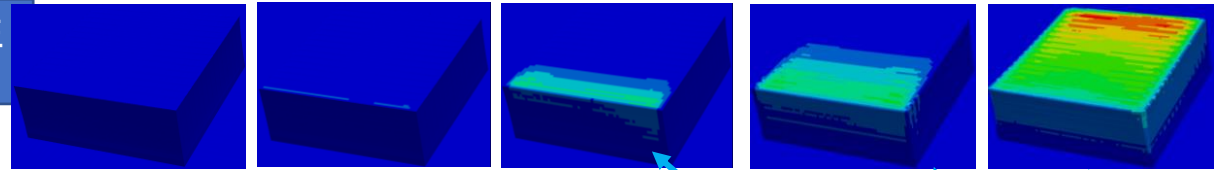
プロット位置



相当
応力



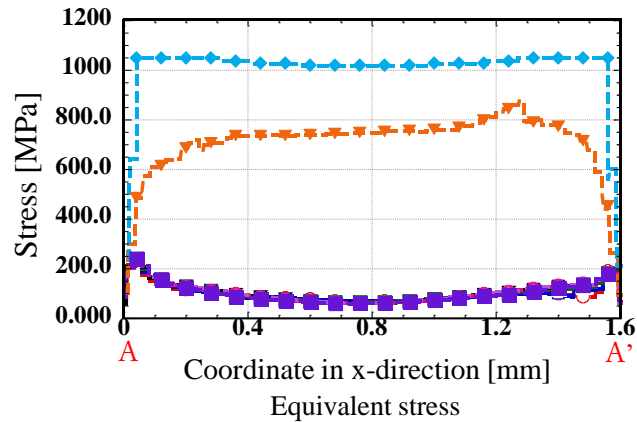
相当塑性
ひずみ



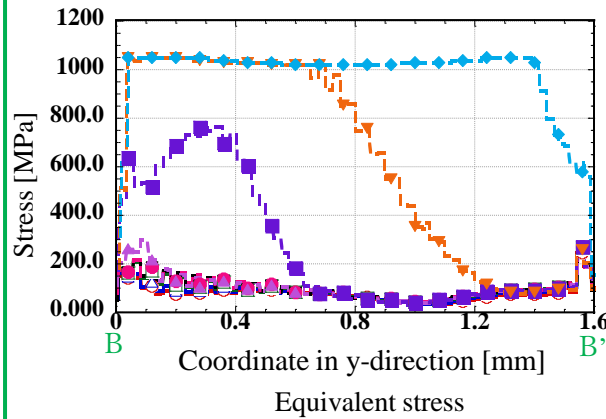
damp: 5.0×10^9 1.0×10^{14} 5.0×10^{14} 1.0×10^{15} 1.0×10^{16}



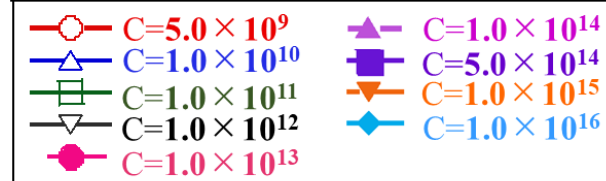
A-A'



B-B'



減衰力により
変形が阻害
↓
ひずみ発生

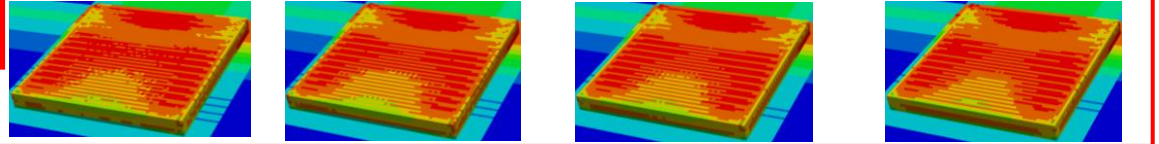


ダンピング係数が 5.0×10^9 より小さいと解析は発散
解析の安定性からダンピング係数は
 $1.0 \times 10^{11} \sim 1.0 \times 10^{13}$ あたりが望ましい

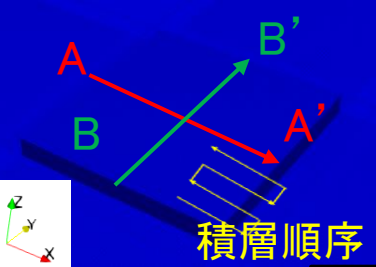
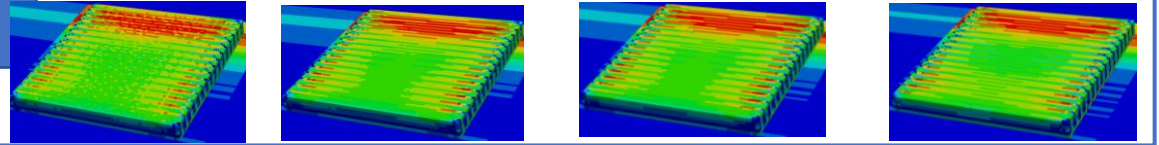
時間増分の解析結果の比較・検討

プロット位置

相当応力



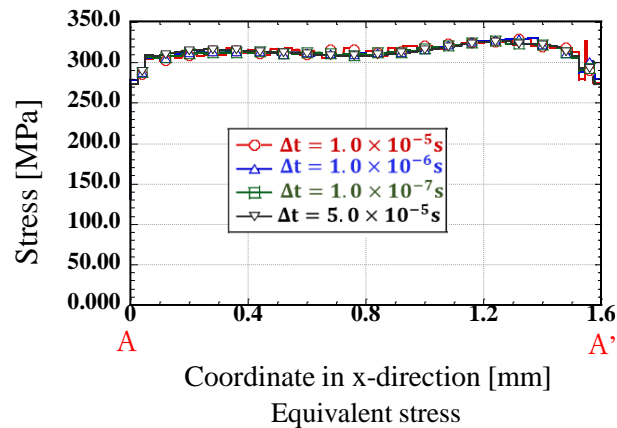
x方向応力



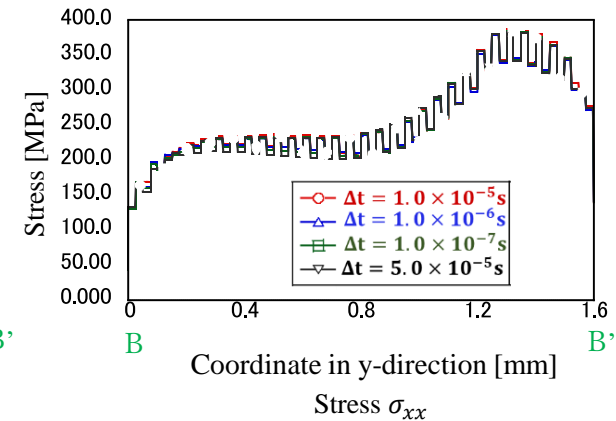
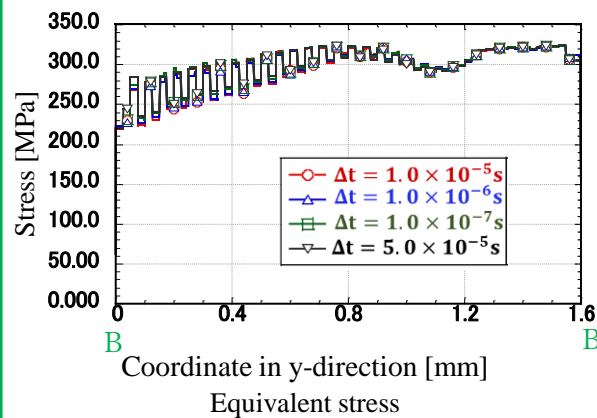
積層順序

時間増分 (s):	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}
解析時間:	5分	20分	3時間	8時間

A-A'



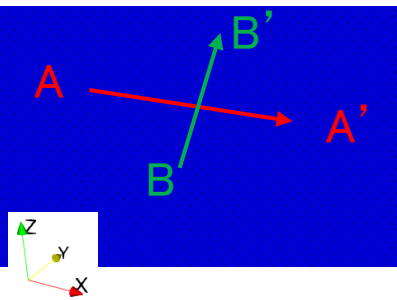
B-B'



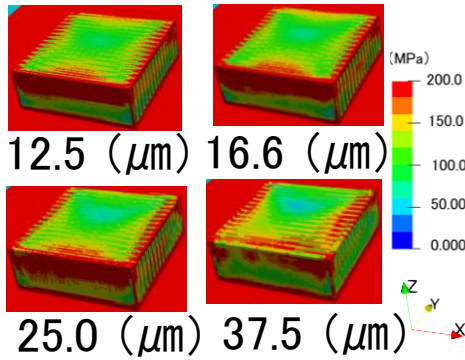
表面の応力は良好に一致
 解析の精度を保ちながら計算効率の良い
 1.0×10^{-5} sが最適

メッシュサイズの解析結果の比較・検討

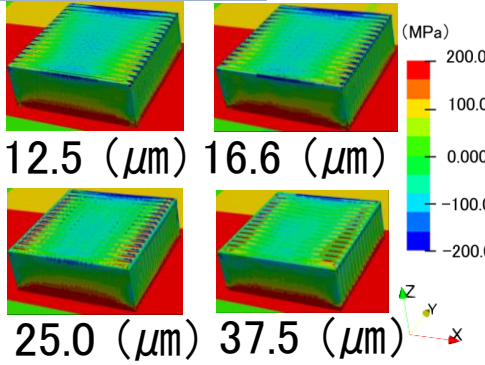
プロット位置



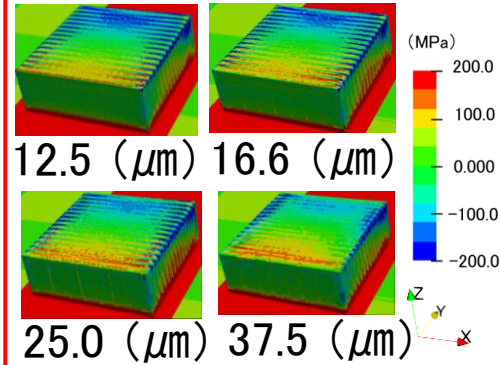
相当応力



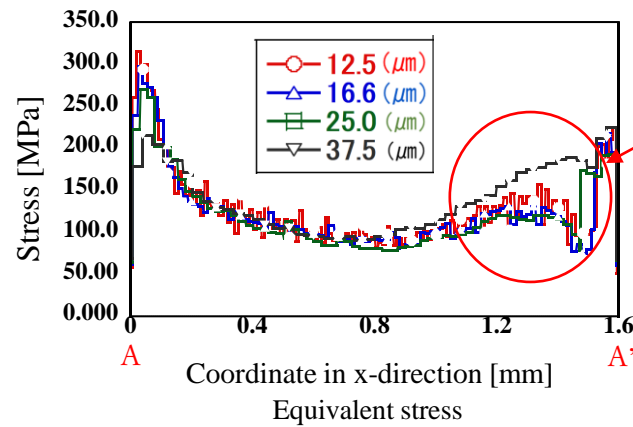
x方向応力



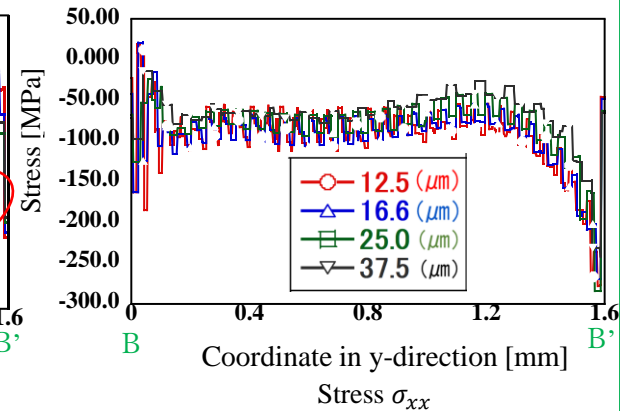
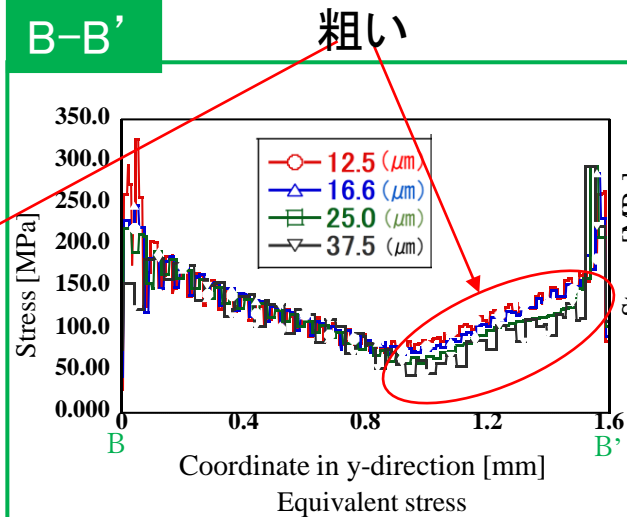
y方向応力



A-A'



B-B'



37.5 (μm)での解析結果が粗い
→25.0 (μm)以下が望ましい

加工パラメータが残留力に及ぼす影響の検討

- 層間温度
- 積層サイズ・順序

層間温度の解析内容

層間温度の定義と影響

層間温度とは
n層の最高温度がある値
になるとn+1層を積層し
始めるというような温度

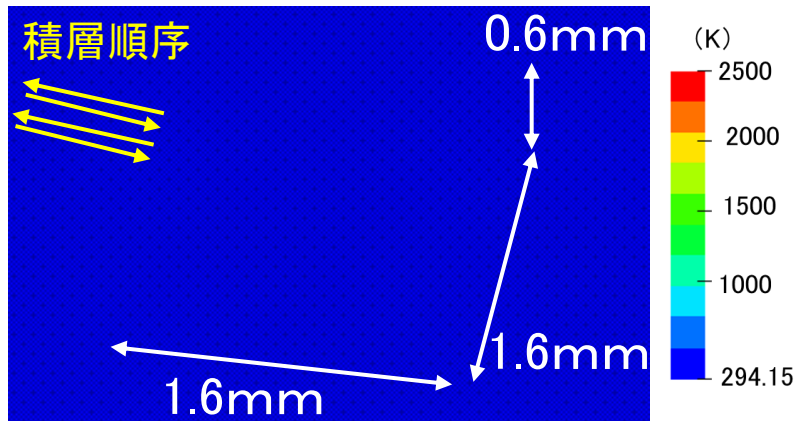
層間温度は積層後の構
造物の残留応力に影響
を与える

表面残留応力の影響

- 構造物表面に割れや欠陥が生じやすい
- 圧縮応力が分布していると初期亀裂の発生・進展が抑制できる

表面に圧縮応力が分布
することが望ましい

本解析での積層構造物



解析条件

時間増分(s)	1.0×10^{-5}
ダンピング係数	1.0×10^{12}

1要素のサイズ

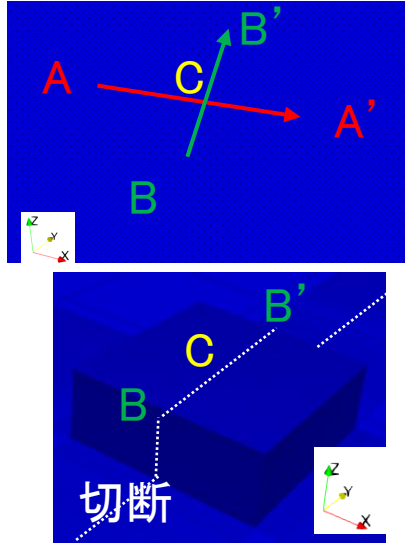
X、Y	25 (μm)	64要素
Z	30 (μm)	20層

提案手法の性質に関する検討から条件決定

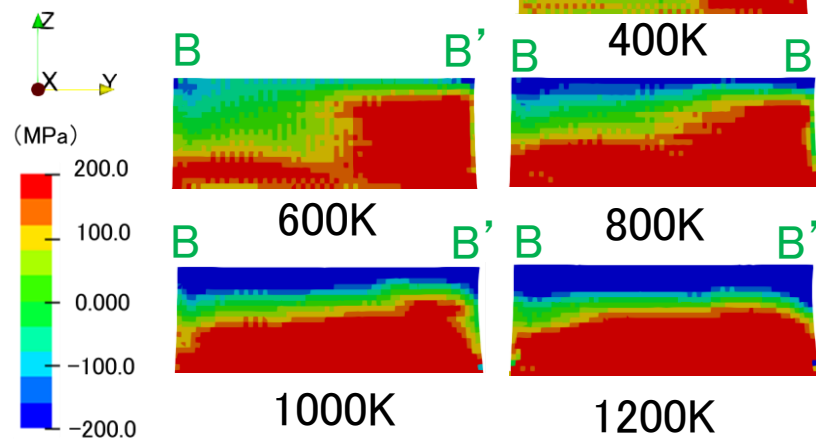
層間温度を変えて残留応力分布の検討をする

層間温度の解析結果の比較・検討

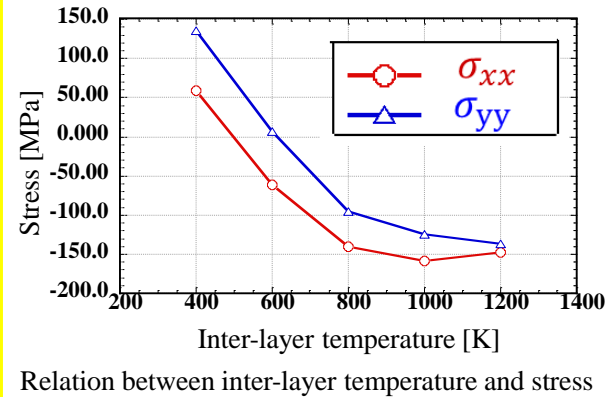
プロット位置



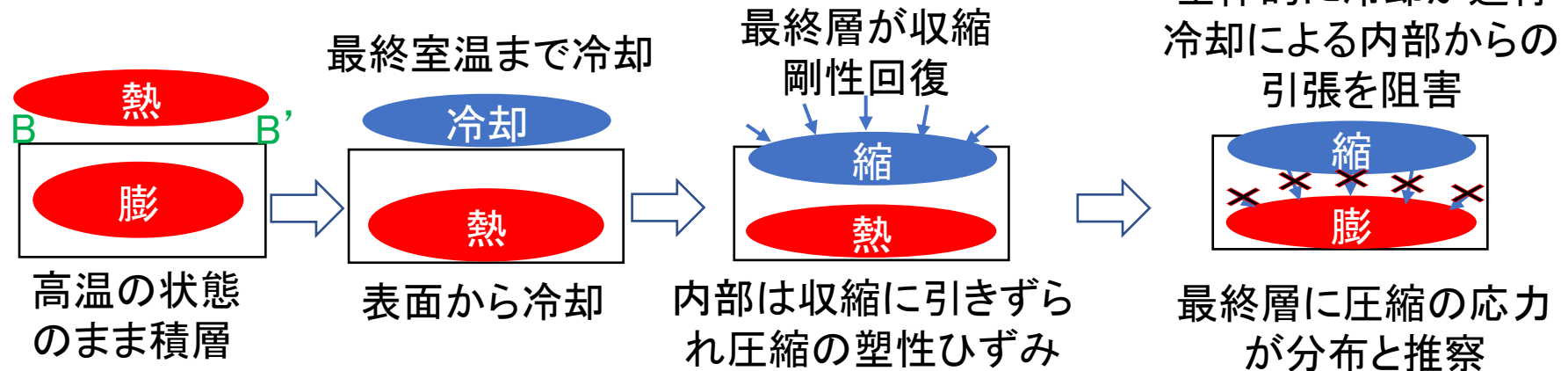
B-B' 断面の
x方向応力



定点Cでの応力変化



層間温度が高いとき

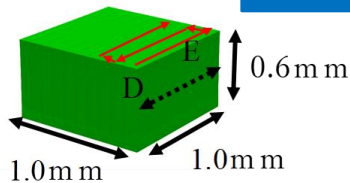


層間温度が大きくなるにつれ応力が小さくなる
層間温度が大きいと最終層に圧縮の応力が分布

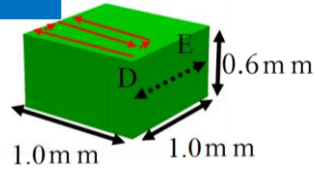
積層サイズ・順序に関する解析

積層造形物

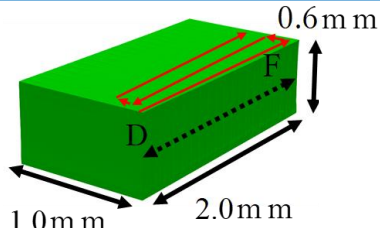
順序2パターン



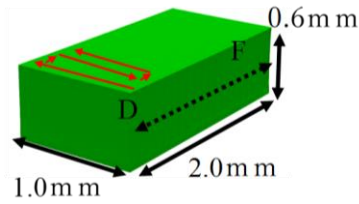
Vertical $L_e = 1.0\text{mm}$.



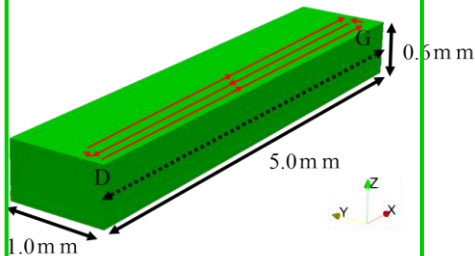
Horizontal $L_e = 1.0\text{mm}$.



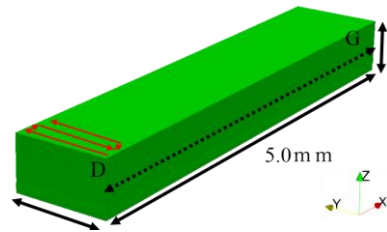
Vertical $L_e = 2.0\text{mm}$.



Horizontal $L_e = 2.0\text{mm}$.



Vertical $L_e = 5.0\text{mm}$.



Horizontal $L_e = 5.0\text{mm}$.

サイズ3パターン

解析条件

時間増分(s)	1.0×10^{-5}
ダンピング係数	1.0×10^{12}

1要素のサイズ

X、Y	25 (μm)
Z	30 (μm)

積層サイズ・順序によって残留応力に与える影響を検討

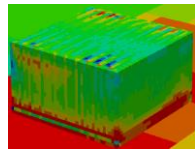
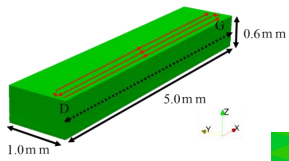
複雑モデルにおける積層造形の残留応力の最適化に利用できる

積層サイズ・順序を変えて残留応力分布の検討をする

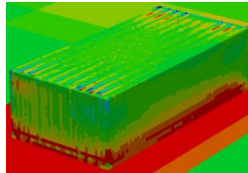
積層サイズ・順序の解析結果の比較・検討

サイズの比較 (Vertical)

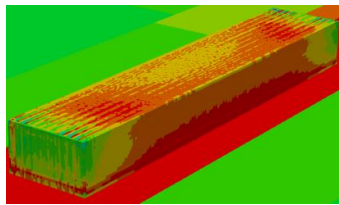
プロット側面



$L_e = 1.0\text{mm}$.



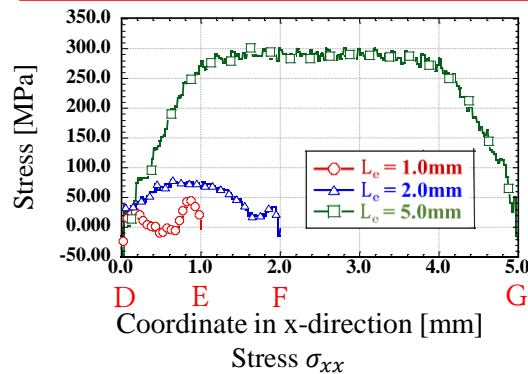
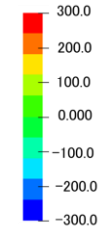
$L_e = 2.0\text{mm}$.



$L_e = 5.0\text{mm}$.

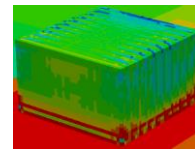
σ_{xx}

(MPa)

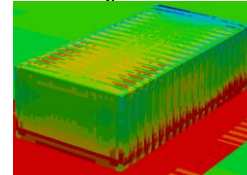


サイズの比較 (Horizontal)

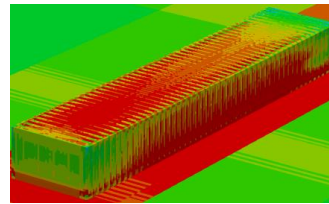
プロット側面



$L_e = 1.0\text{mm}$.



$L_e = 2.0\text{mm}$.

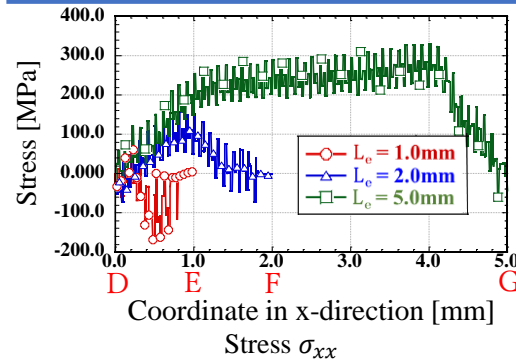
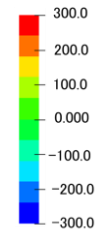


$L_e = 5.0\text{mm}$.

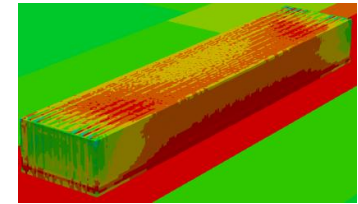
σ_{xx}

σ_{xx}

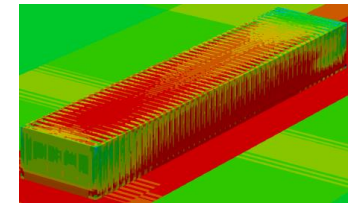
(MPa)



順序の比較



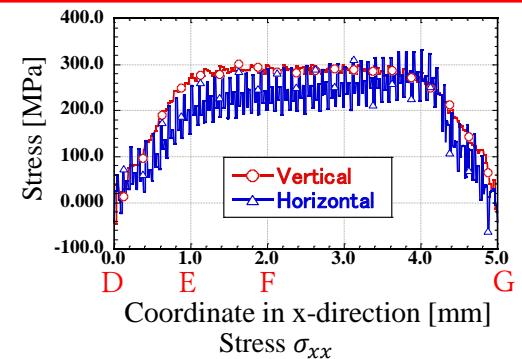
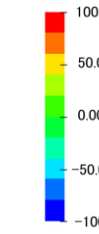
Vertical



Horizontal

σ_{xx}

(MPa)



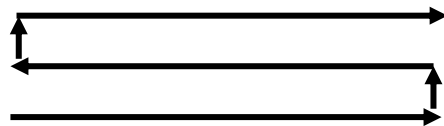
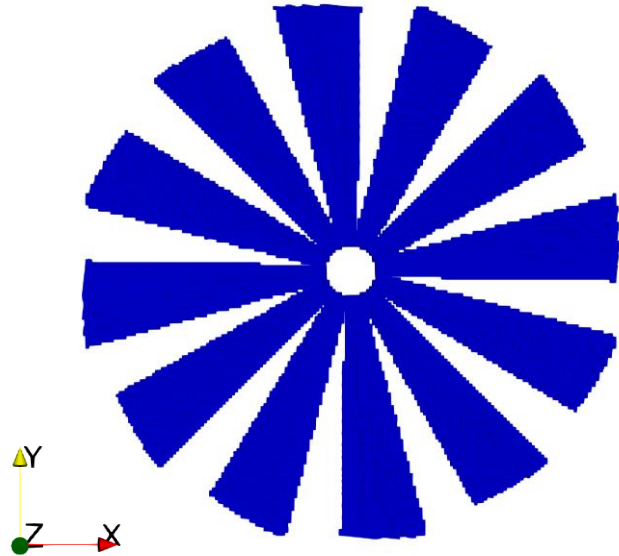
長手方向に長いほど応力が大きくなる傾向
レーザーの向きとプロットの仕方で振動するような結果となった

複雑構造物への適用

複雑構造物の解析

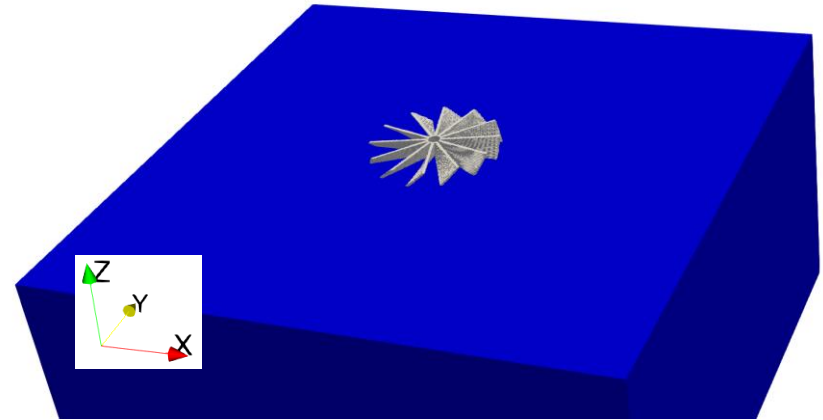
回転機器を模した複雑モデルに提案解析を適用

造形物



積層順序

積層後の状態



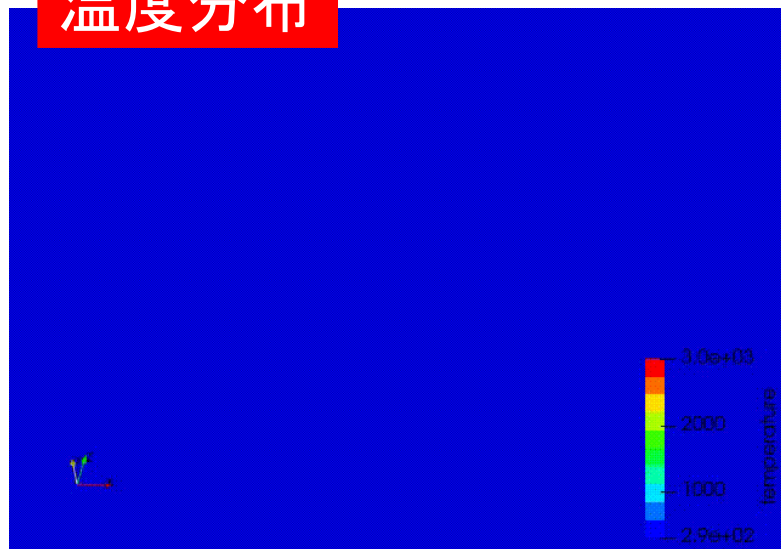
解析条件

出力 (W)	140
積層速度 (mm/s)	800
レーザー半径 (μm)	25
層間温度 (K)	600

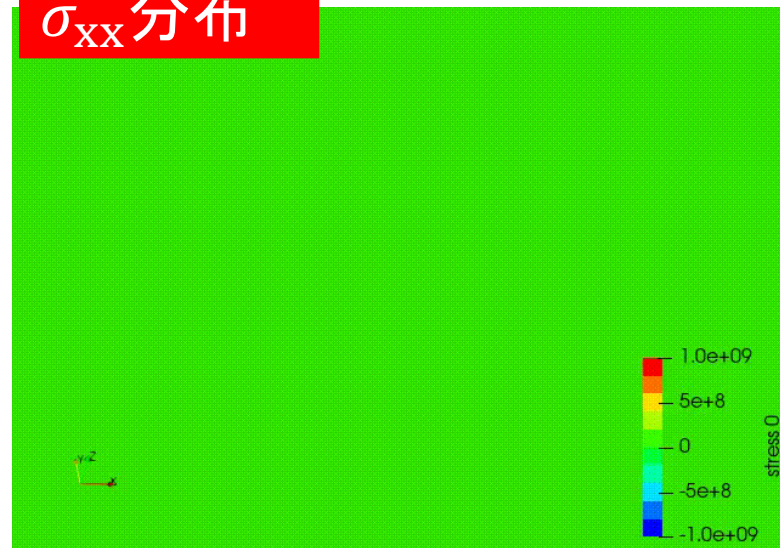
材料はSUS316Lを仮定

複雑構造物の解析アニメーション

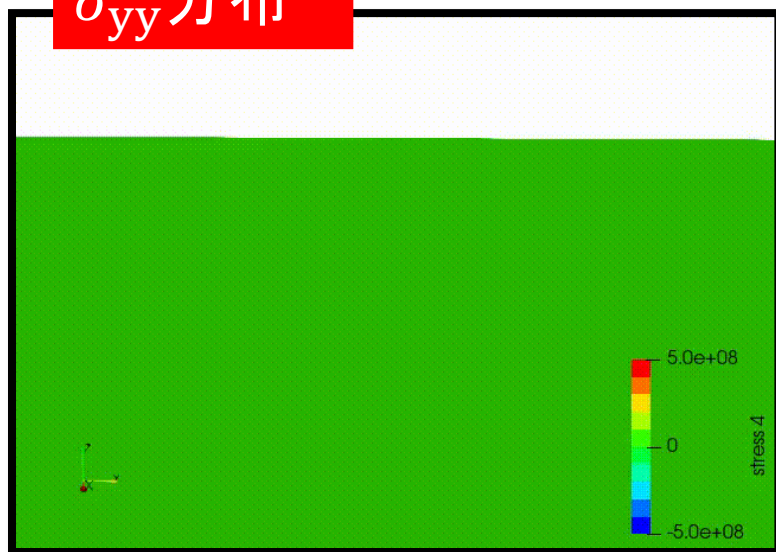
温度分布



σ_{xx} 分布



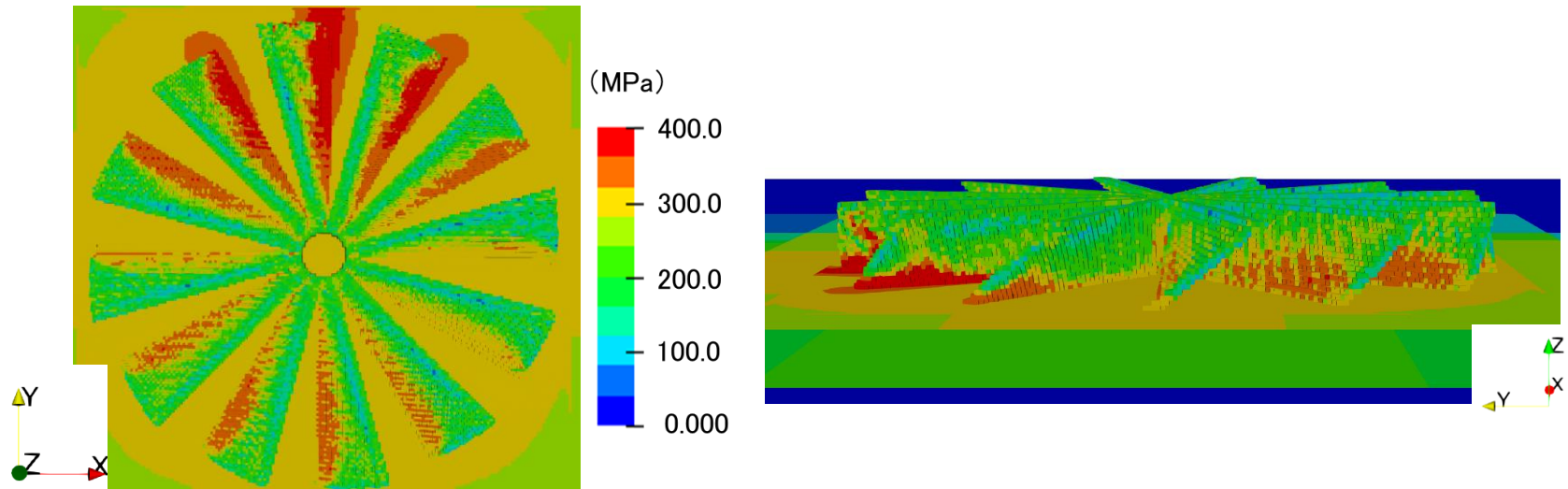
σ_{yy} 分布



このような複雑な
モデルに適用可能

複雑構造物の解析結果

相当応力分布



ベースプレート付近の相当応力が大きい結果となった
→ベースプレート付近での造形に注意が必要

このような複雑モデルの解析が可能

結言

本研究では、金属積層造形時の残留応力の可視化目的とし、動的・静的混合解法という新しい手法についての有用性について検討した。動的・静的混合解法を用いて計算手法に関する検討と物理的理論に関する検討を行った結果以下の知見が得られた。

- ダンピング係数に関する検討では、ダンピング係数が大きすぎると減衰力が大きくなるため金属の変形が阻害されることでかなり大きな応力やひずみが発生することが明らかとなった。そのため、ダンピング係数は 1.0×10^{11} から 1.0×10^{13} あたりが適切だと考えられる。
- 時間増分に関しては解析結果の比較と解析時間を考慮すると 1.0×10^{-5} sが良い
- メッシュサイズは $25.0 \mu\text{m}$ 以下の解析だと解析結果が良好に一致することから、解析精度と解析結果のデータ容量を考慮すると $25.0 \mu\text{m}$ のメッシュで解析を行うのが賢明だという結論に至った。
- 層間温度が低い解析と比べると、層間温度が高い解析だと構造物積層完了後に室温まで冷却する過程で、最終層に圧縮の応力が発生し、構造物内部には引張応力が分布することから、構造物の最終層での強度が高くなると考えられる。
- 積層サイズを長くすると相当応力が大きくなる傾向があり、構造物端部と中心部で異なる応力分布となる。積層順序に関しては、積層順序が縦向きと横向きの場合では応力分布の大きさに顕著な違いは現れないが、分布形状は入熱スパンとの方向によって異なる。
- 複雑なモデルの解析に適用可能