

Digimat-AM による 3Dプリンタ向けのプロセスシミュレーション

第5回 複合材成形のための3Dプリンティングに関するワークショップ

エムエスシーソフトウェア株式会社 / eXstream engineering

12. 2017

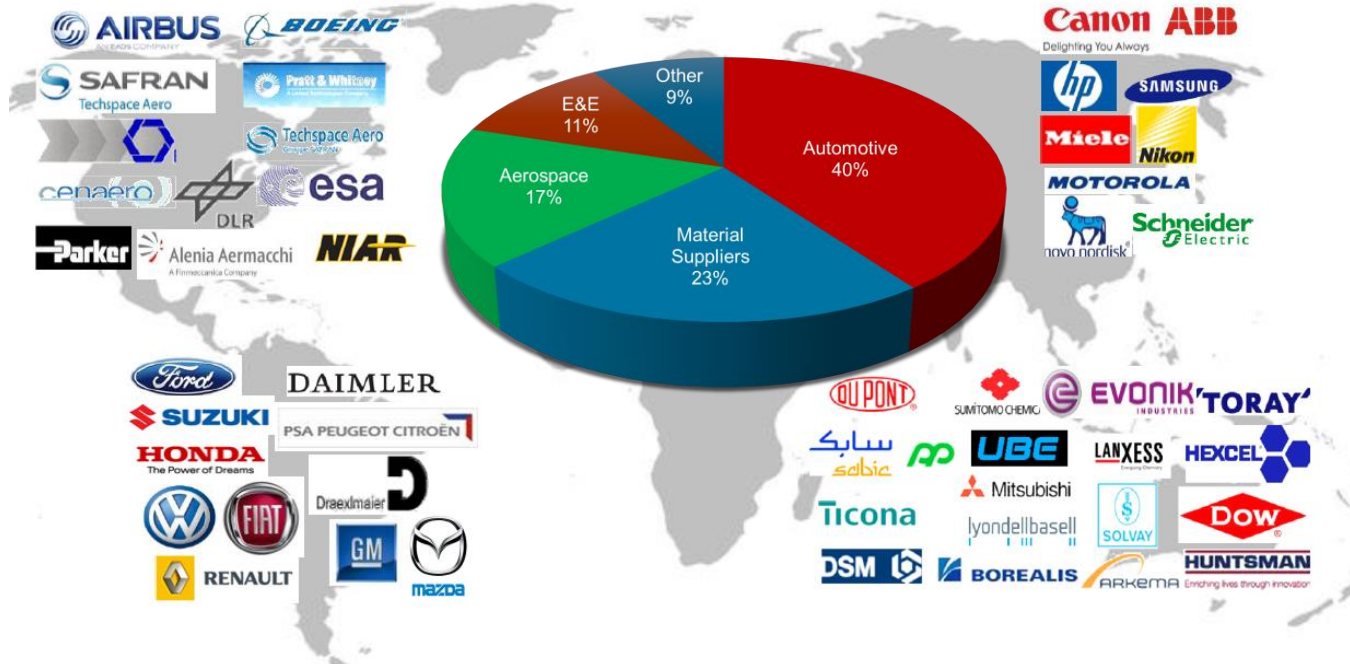
Digimatの概要

マルチスケール非線形複合材料モデリングのためのプラットフォーム

Digmatの概要

e-Xstream engineering

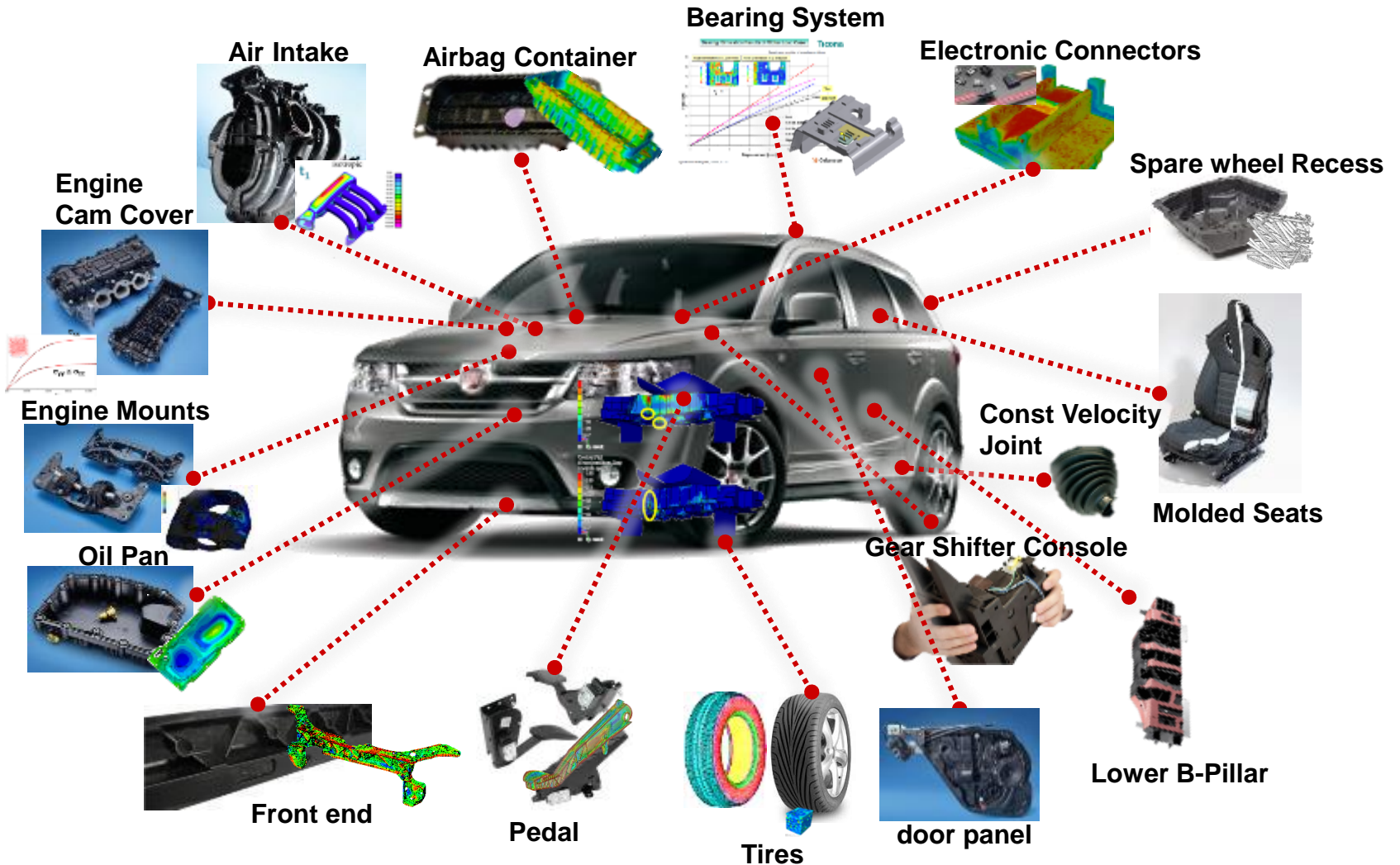
- Material modeling company – e-Xstream engineering –
 - 主要な自動車・航空メーカー、材料メーカーがユーザー



- 本社：ヨーロッパ（ベルギー/ルクセンブルク）
- 250社以上のユーザー
- 60名以上の社員→材料モデリングのみに特化
- 2012年よりMSCのグループ会社
→ 1200+ persons/20 countries

Digmatの概要

複合材料化の動き



Digimatの概要

複合材料のメリットと課題

- 複合材料のメリット

- 低比重・加工性(ポリマー) + 強度(繊維・フィラー)
- 選択的機能性—添加物による機械特性・熱特性・伝導特性の強化・付与

- 複合材料の課題

- 不均一な材料特性
 - 材料特性は添加物の分布、繊維の向き等の影響を受ける
 - そのため、これまで均一な物性を対象としてきた解析を困難にしてしまう
- 材料特性発現メカニズムが複雑
 - 材料開発に多くの試行錯誤が必要
- ポリマーを母材とする複合材は環境条件(温度・湿度)の影響を受けやすい
 - 材料試験の回数が膨大に



これらの課題を解決するソリューションとして



Digmatの概要

Digmatとは？

Digmat — マルチスケール非線形複合材料モデリングのためのプラットフォーム

- **Digmatの役割**

- 複合材料の材料特性予測
 - 繊維・添加物の含有量、配向等を考慮して材料特性を計算
- 各種CAEソフトウェアとの連携による複合材料シミュレーション
 - 樹脂流動解析から得られた繊維配向のデータを構造解析へ引き継ぎ

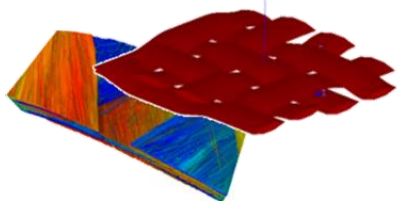
- **Digmatの活用**

- 複合材料を対象とした構造解析の高精度化
 - 異方性を考慮した非線形の材料モデリング
 - 樹脂流動解析等との連携による材料特性の不均一な分布を反映
- 材料開発の促進
 - 詳細な材料挙動の可視化による効率的な材料開発
- 材料試験の回数の低減
 - Digmatによる仮想材料試験

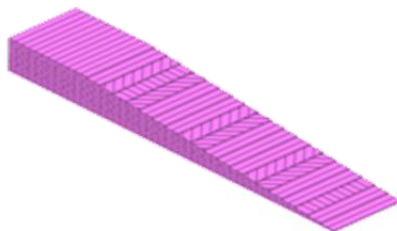
Digmatの概要

Digmatの解析対象となる材料

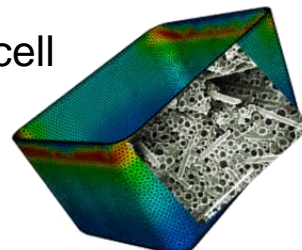
織構造



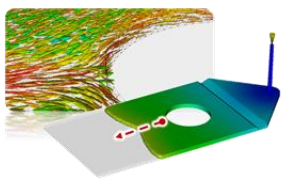
連続繊維



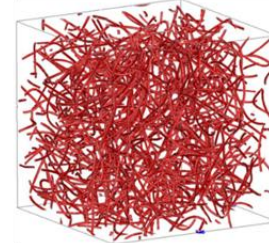
Mucell



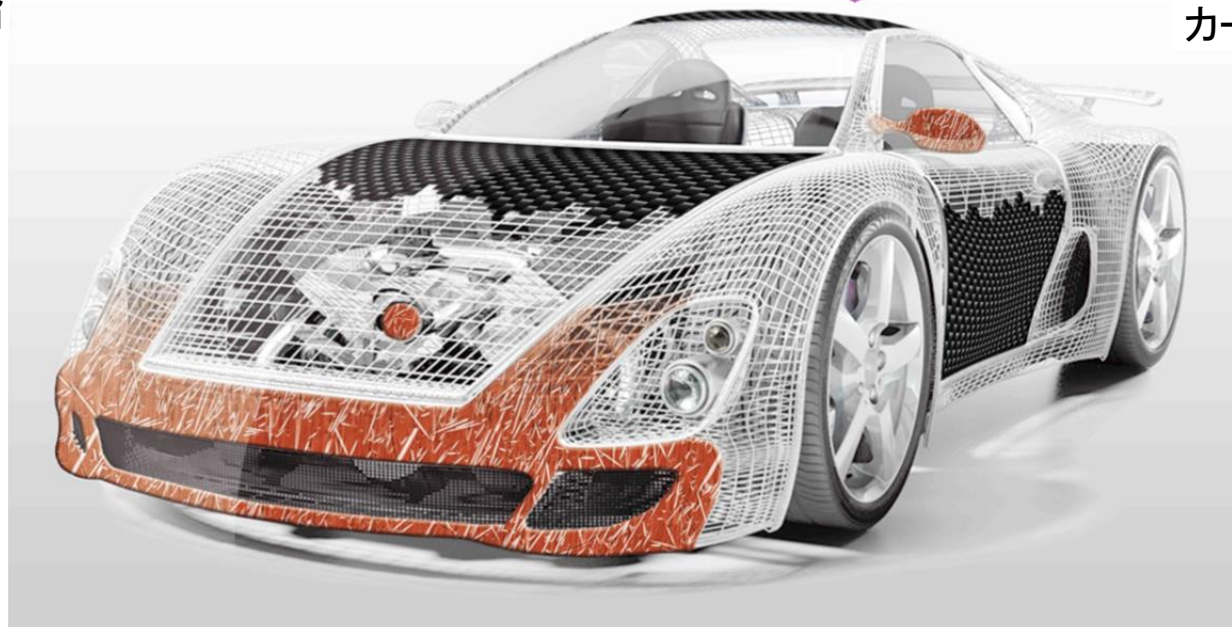
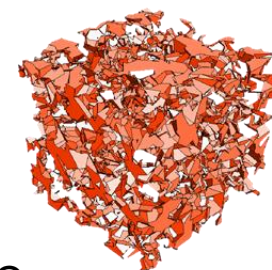
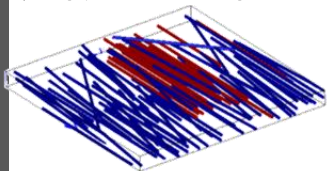
短繊維強化樹脂



カーボンナノチューブ



長繊維強化樹脂



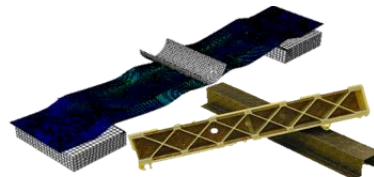
不連続長繊維



編み構造



オーバーモールド成型



MMC (Metal Matrix Composite)
CMC (Ceramic Matrix Composite)

Digmatの概要

Digmatのラインナップ

Digmat-MF

MF

複合材料の非線形構成挙動を予測するために使用される平均場均質化ソフトウェア

Uniaxial stress-strain curve

- Strain rate = 0.001 s⁻¹
- Strain rate = 0.1 s⁻¹
- Strain rate = 10 s⁻¹

Digmat-MAP

MAP

射出成形解析結果をFEMメッシュに転送する3Dマッピングソフトウェア

Digmat-MX

MX

材料パラメータを同定し、DIGMATの材料モデルのデータベースとなるプラットフォーム

true strain vs true stress

Digmat-CAE

CAE

射出成形解析結果とDigmat-MF材料をFEMソルバーにリンクさせるインタフェースモジュール

実験・計測
応力-ひずみ曲線

Digmat
材料モデル
非線形・異方性

マッピング
樹脂流動メッシュ → 構造メッシュ

有限要素解析

樹脂流動解析

Digmat-RP

RP

樹脂流動解析と構造解析の連成解析のため、MF、CAE、MAP、MXの機能の一部を持った統合GUI環境

Digmatの概要

Digmatのラインナップ

Digmat-FE

FE

材料の微細構造の代表体積要素(RVE)を用いた有限要素モデリング

Digmat-AM

AM

樹脂積層造形をシミュレートし、残留応力、反りの計算や、積層設定の最適化を行うソリューション

Digmat-VA

VA

積層複合材の設計許容値を算出する仮想クーパーン試験のための専用ソリューション

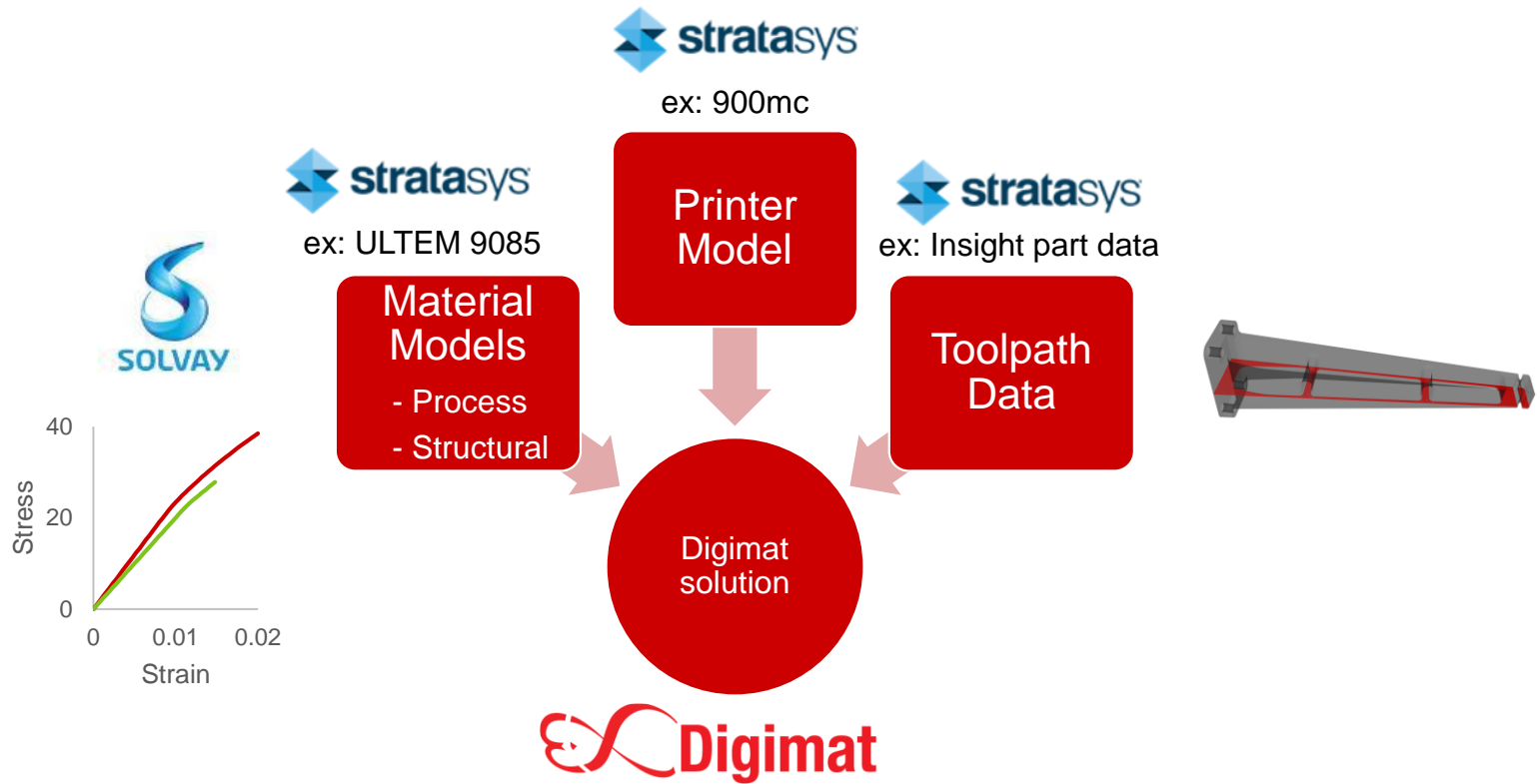
Digmat-HC

HC

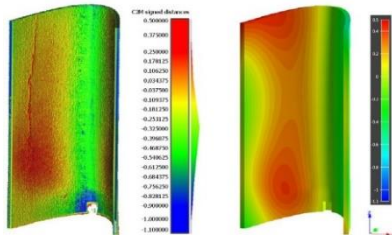
ハニカムサンドイッチパネルの等価剛性を計算し、三点曲げ・四点曲げを計算

Digmatの概要

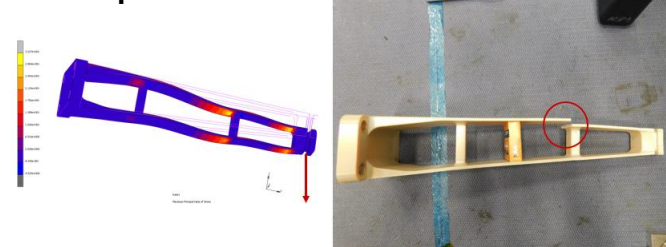
Digmat-AM



Process simulation



Part performance



積層造形

Additive Manufacturing (AM)

プラスチックの積層造形

熱溶解積層法(FFF)の処理例

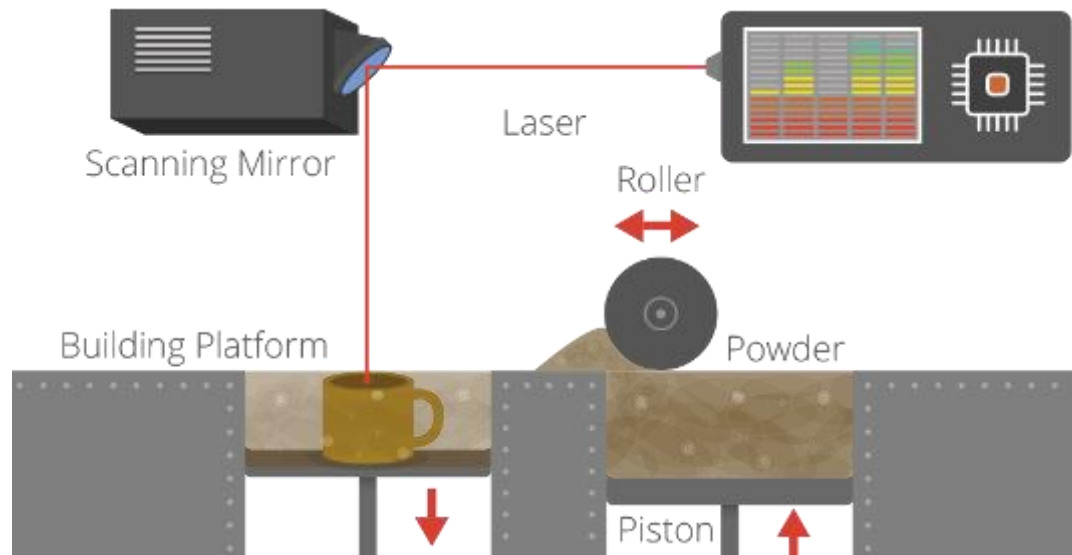


積層造形は、一般的に性能とコストがトレードオフの関係にあります

プラスチックの積層造形

レーザーの焼結(SLS)

- 粉末材料にレーザーをあてて、焼結します
 - 無充填ポリマー
 - 強化ポリマー
- レーザーは部品の断面をスキャンすることで、粉末を選択的に焼結します
- 1層分の造形が終わると、ステージが積層ピッチ分だけ下がり、次の層が積層されます
- サポート構造の必要はありません



プラスチックの積層造形

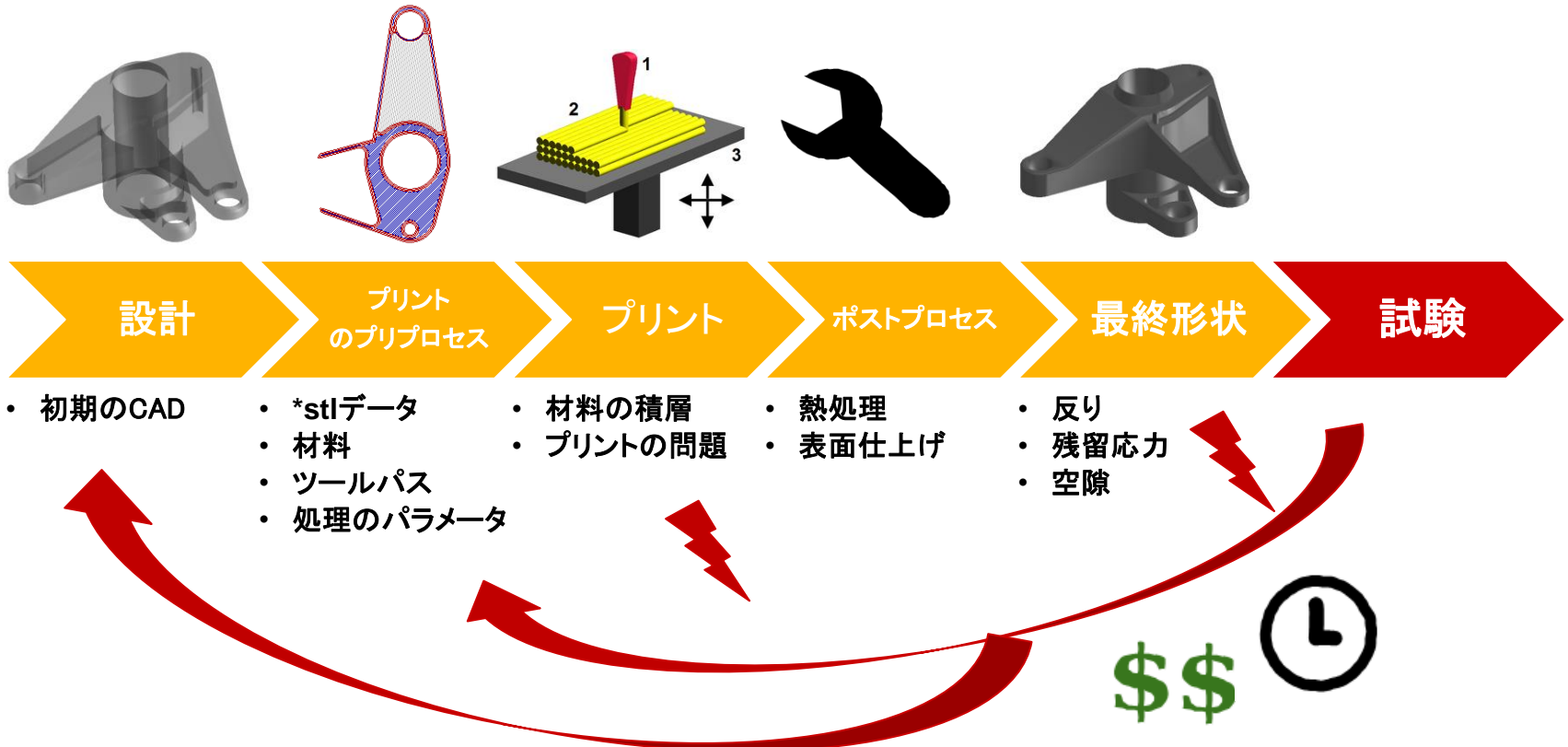
積層造形における製造上の問題

- 製造の準備にかかるコストの問題
- 新しいグレードが開発されるまでの長い開発期間の問題
 - 材料の機械的特性を決定するまでの時間
- プリントされた部品の信頼性の問題
 - 設計精度(反り)に問題はないか？
 - 欠陥はないか？
 - プリント方向への衝撃は大丈夫か？
 - サポート構造は必要か？
- 処理スピードとロバスト性の問題
- 多数の処理パラメータの問題
 - それぞれのパラメータの効果が出ているか？
 - 処理の最適化はされているか？
- 部品性能を証明する問題
 - 機械的試験に費用がかかる

プラスチックの積層造形

現在の積層造形のワークフロー

- プラスチックの積層造形は次のようなワークフローとなります

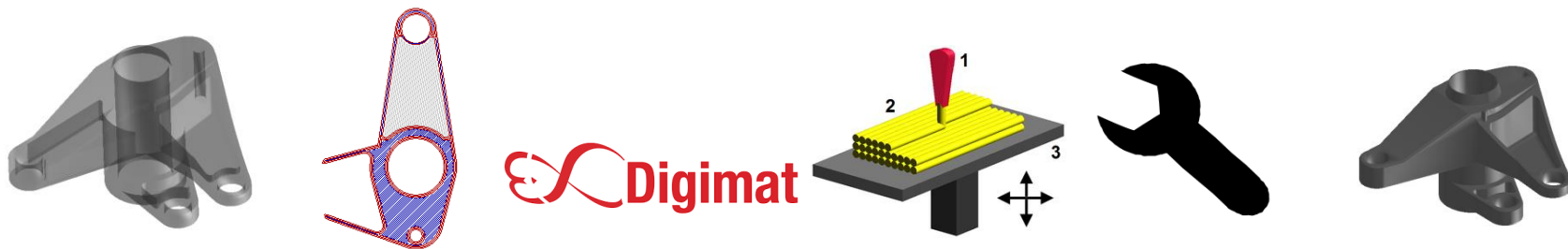


トライアンドエラーによる手法

プラスチックの積層造形

シミュレーションによって最適化された積層造形のワークフロー

- ・ シミュレーションを適用することで、トライアンドエラーを減らします。



・ 初期のCAD

- ・ *.stlデータ
- ・ 材料
- ・ ツールのパス
- ・ 処理パラメータ

・ 材料の積層

- ・ 熱処理
- ・ 表面処理

- ・ 最小化された反り
- ・ 最小化された残留応力



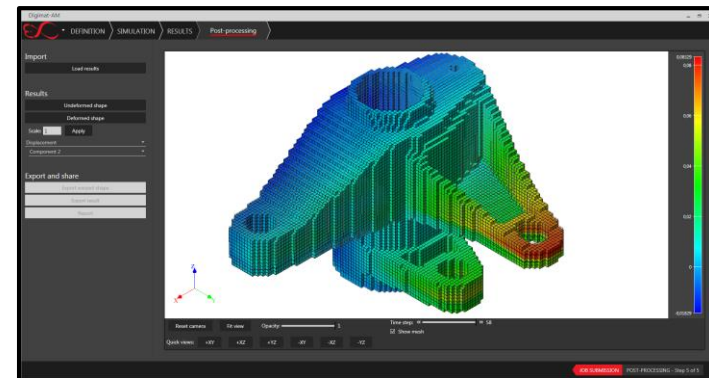
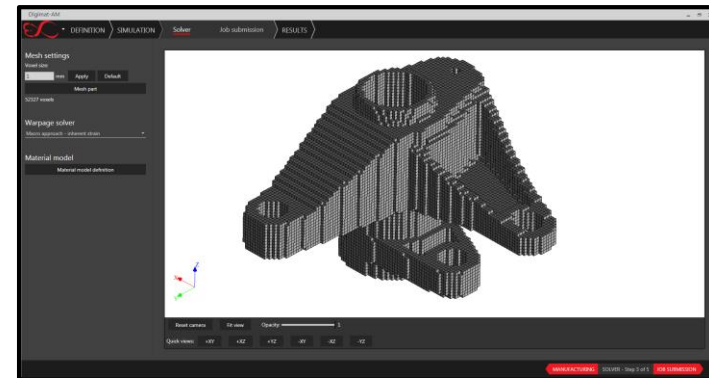
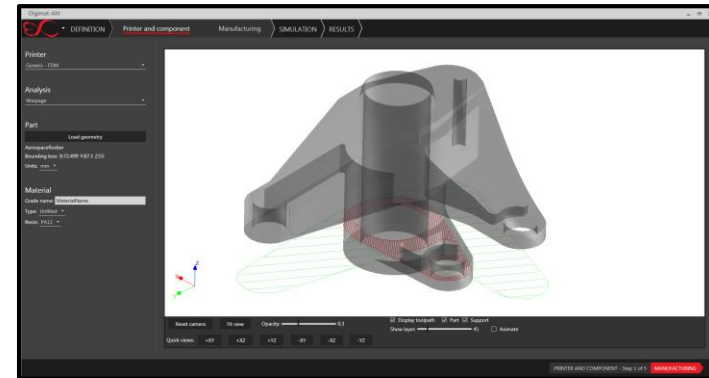
最適化

積層造形のプロセスシミュレーション

積層造形のプロセスシミュレーション

弾塑性部品の製造を効率化するプロセスシミュレーション:Digimat-AM

- シミュレーションの目的
 - 反り・残留応力の予測
 - プロセス中のパラメータや材料選択による影響の考慮
- シミュレーション可能な積層造形プロセス
 - SLS(レーザー焼結)
 - FDM(熱溶解積層法)
- 材料
 - 無充填のポリマー
 - 繊維もしくはビーズ充填ポリマー
- アウトプット
 - 変形形状
 - 残留応力



積層造形のプロセスシミュレーション

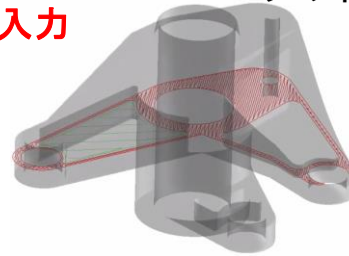
Digimat-AMによるプロセスシミュレーション

- 初期形状
- 材料の仕様



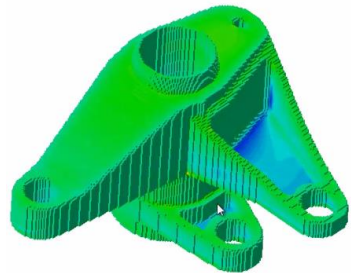
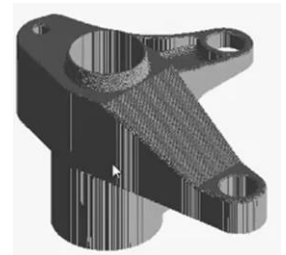
ユーザーによる入力

- ツールパス
- プロセスのパラメーター
- パーツのポジショニング



プリンター
プリプロセス

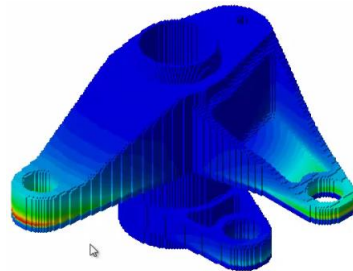
- メッシュ生成
- ビーズの積層
- 応力の生成
- 応力緩和



パフォーマンスの最適化

- ツールパス
- プロセスパラメータ

微細構造

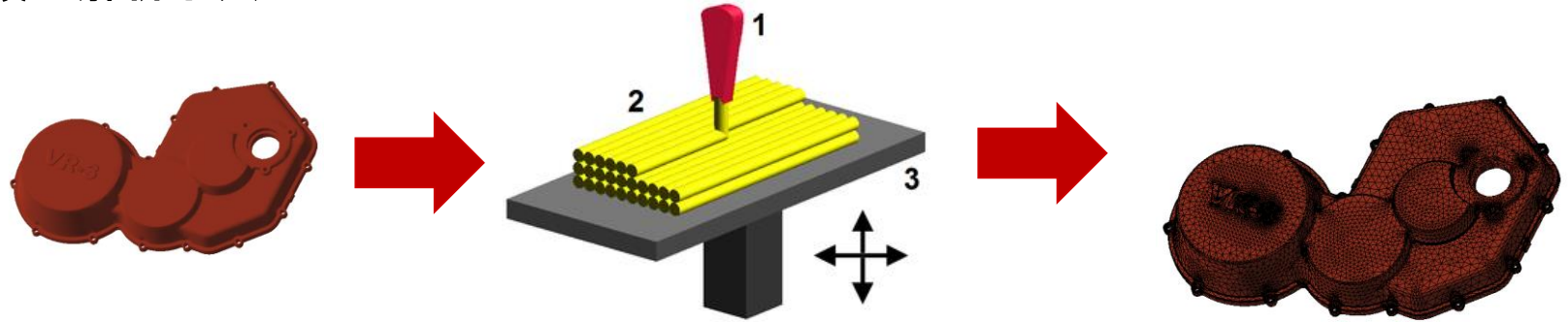


- 残留応力の分布
- 最終変形形状
- ポストプロセス

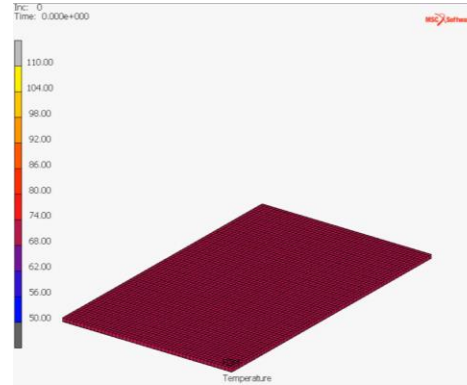
プロセス

プラスチックの積層造形

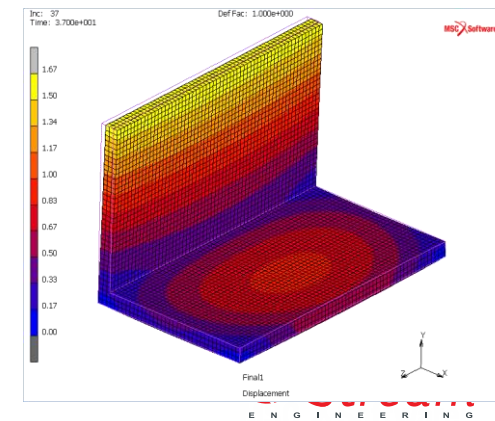
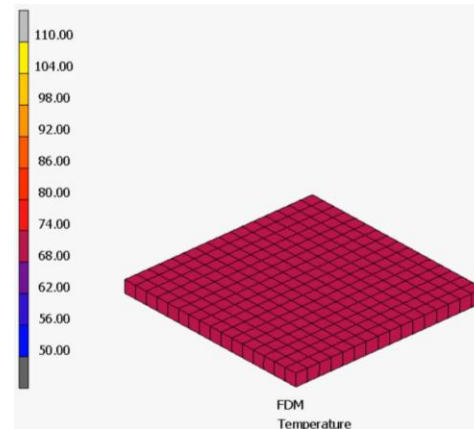
2種類の解析手法



Direct process simulation

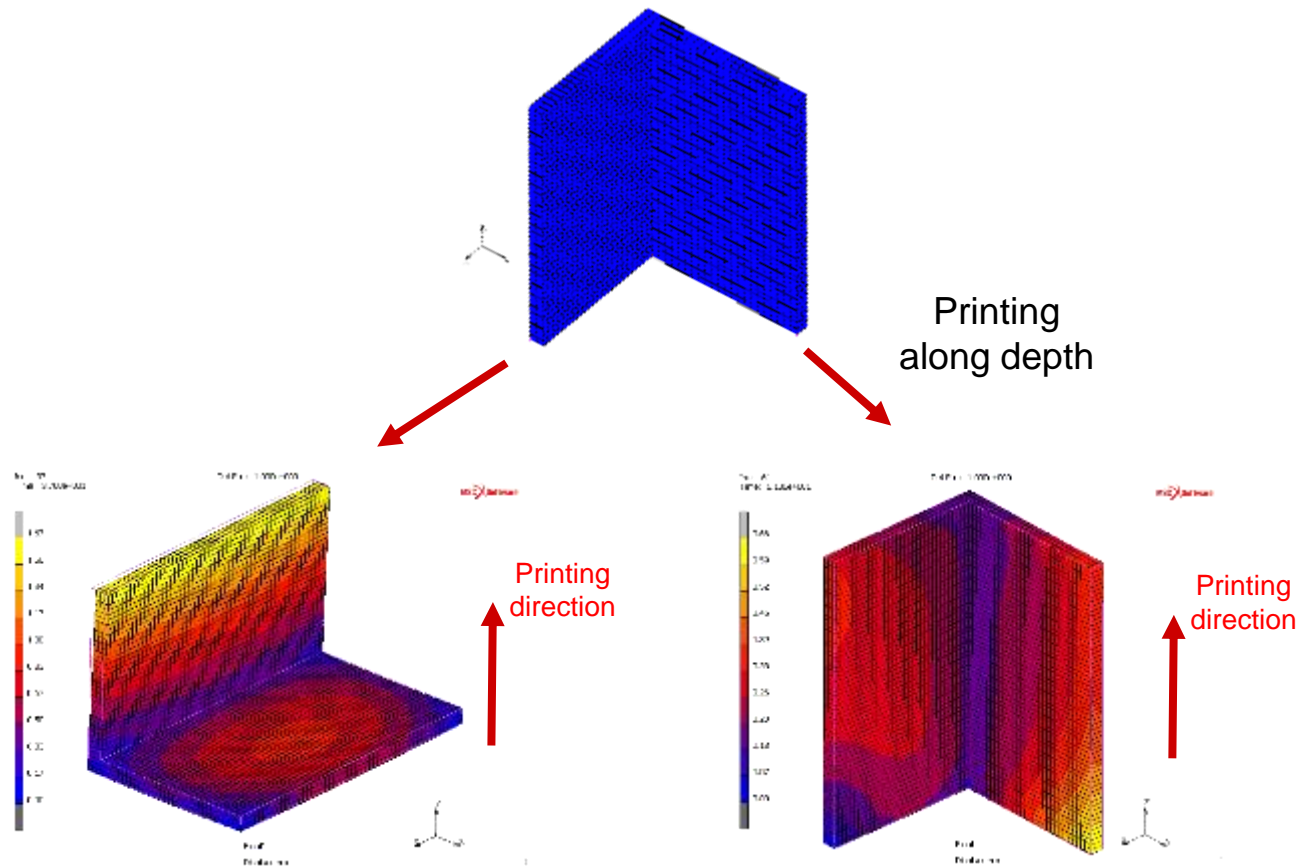


Inherent strain method



プラスチックの積層造形

積層方向による反り方の違い



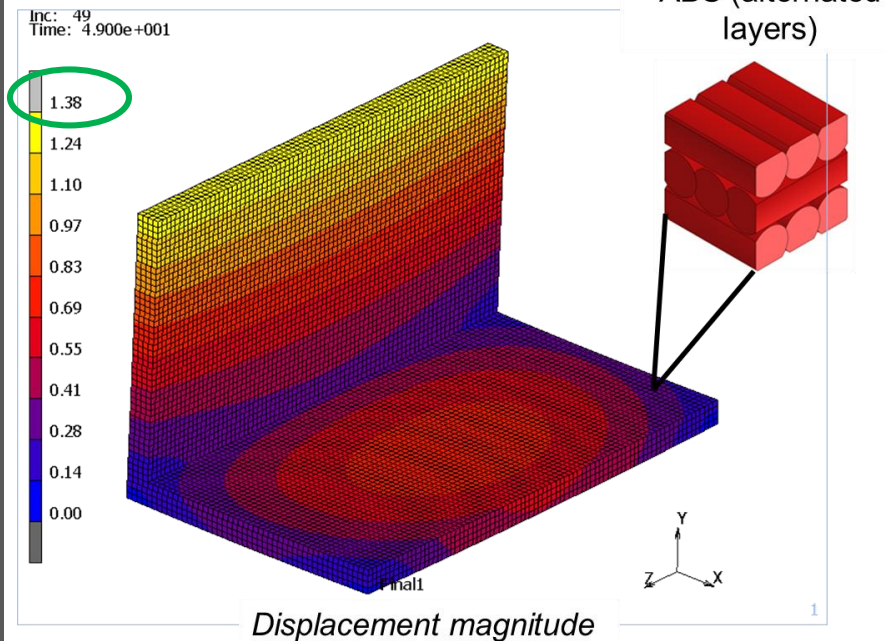
- 積層方向の違いによる反りの違いを予測します。

→ 精度よく反りを予測することで、実際の成型前に反りを考慮した形状設計を行うことができます。

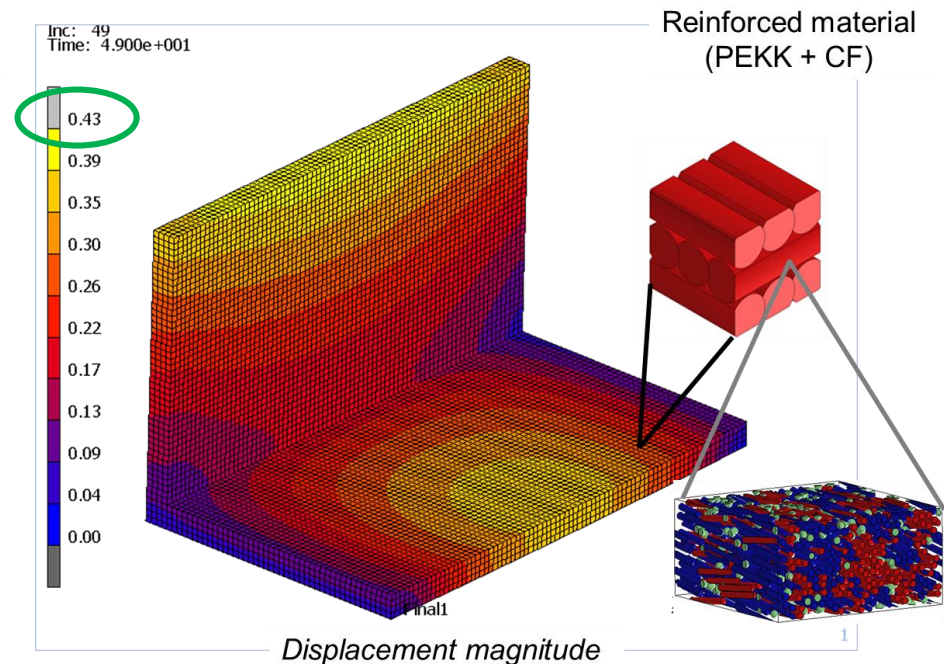
プラスチックの積層造形

異方性を考慮した材料特性

ABS bulk
 $E = 2400 \text{ MPa}$

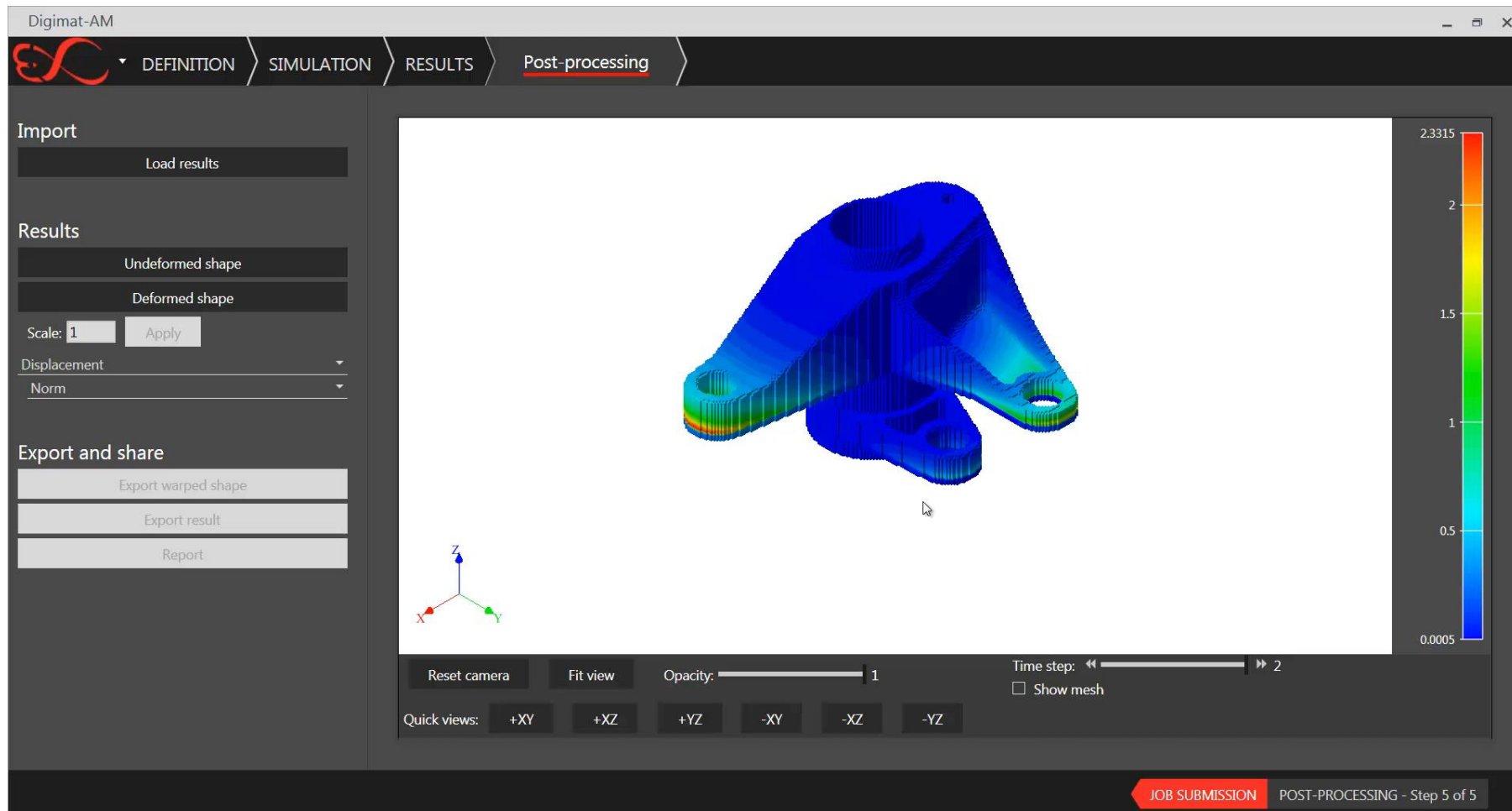


Composite
 $E = 36931 \text{ MPa}$



積層造形のプロセスシミュレーション

Digmat-AMによる反りや残留応力を予測するソリューション

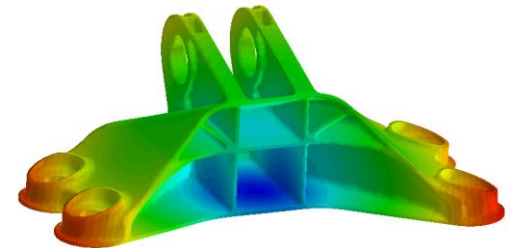
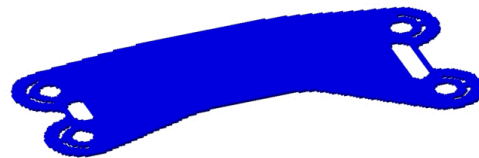
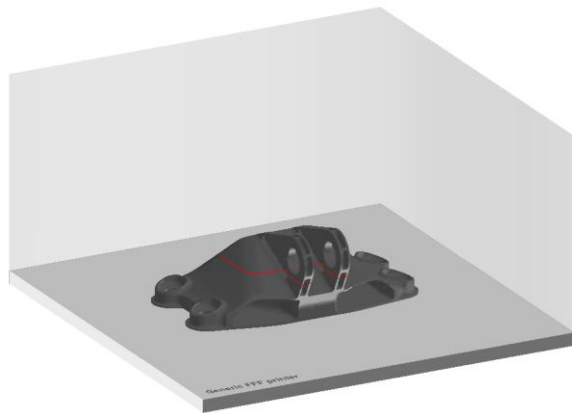


Digimat-AMによる反り予測

Digmat-AMによる反り予測

デザイン形状に整形した場合の反り予測

- 材料: ABS樹脂
- 成形工程の設定
 - FFF
 - ツールパスの指定
 - プロセスパラメータ



成形工程の設定



Digmat-AMによる
シミュレーション



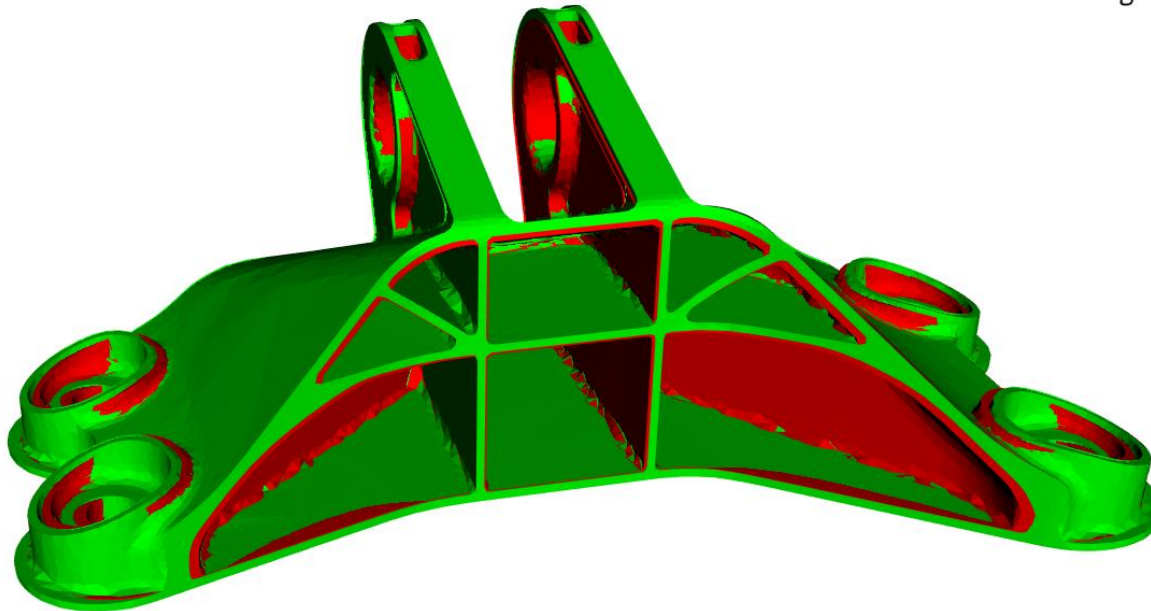
反り予測

Digimat-AMによる反り予測

デザイン形状に整形した場合の反り予測

- デザイン形状と反りの比較
 - デザイン形状
 - 成形形状（反り予測を反映させた形状）

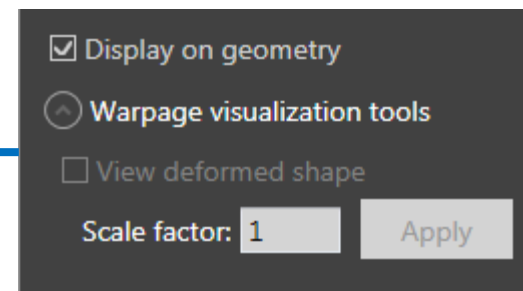
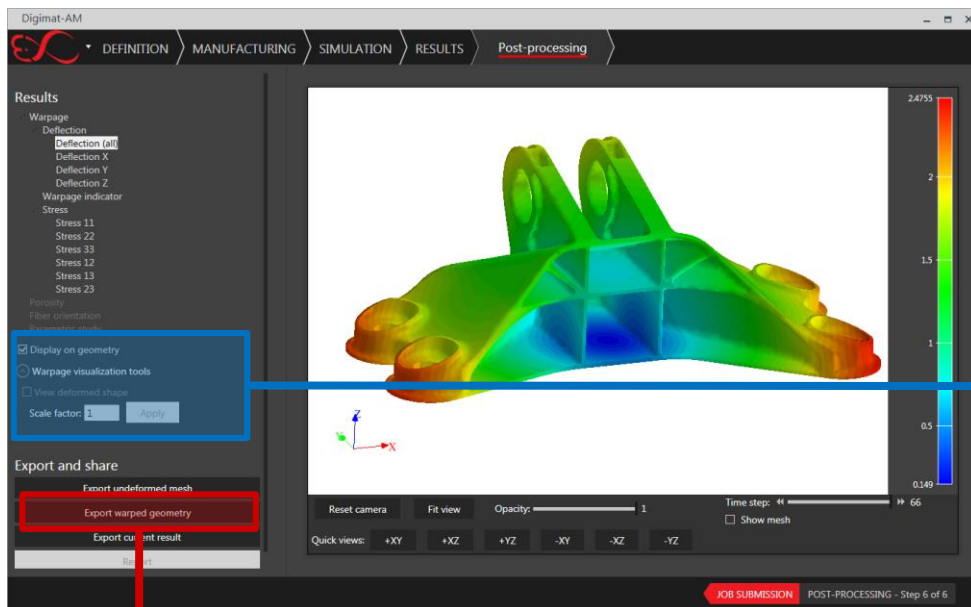
 Digimat



- 反りの発生により、デザイン形状から大きくずれてしまっています。

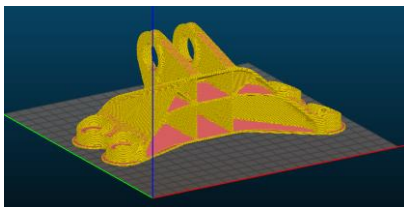
Digmat-AMによる反り予測

Digmat-AMによる寸法精度の向上

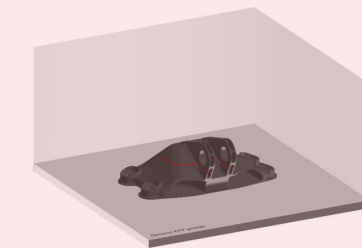


反りによる変位に任意の倍率を指定可能

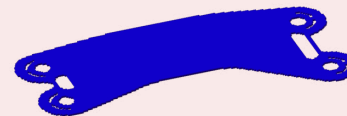
反りを反転させた形状を出力
→出力した形状を元にした解析を実行可能に



補正済み形状

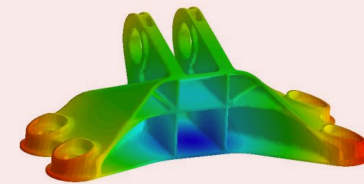


成形工程の設定



Digmat-AMによる
シミュレーション

Digmat-AM workflow

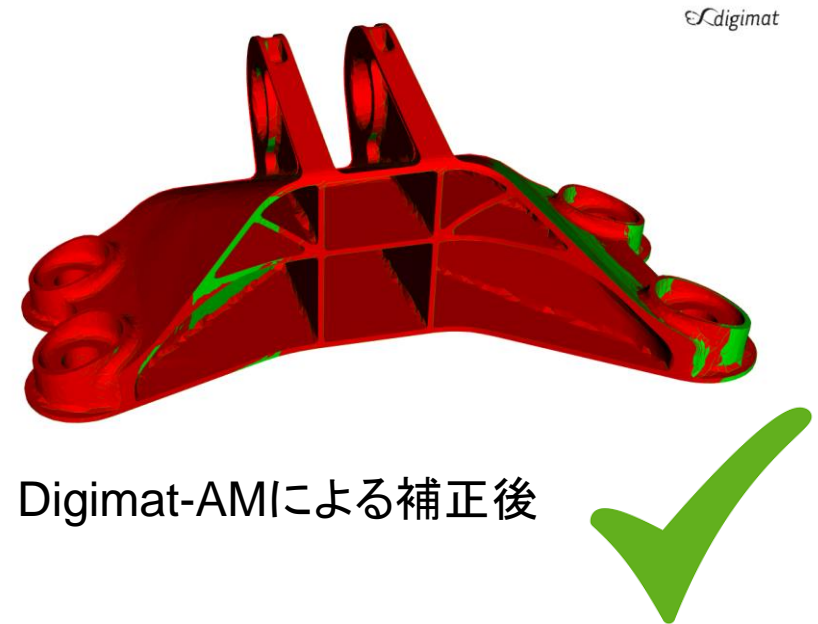
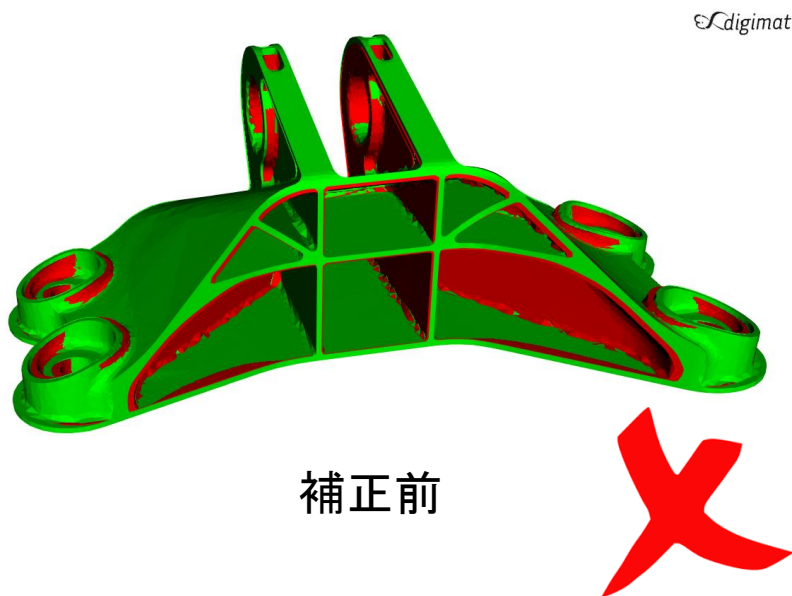


反り予測

Digmat-AMによる反り予測

補正済み形状に整形した場合の反り予測

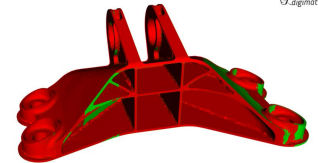
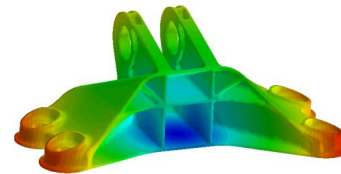
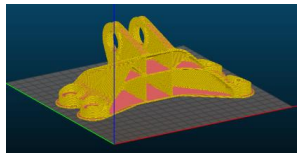
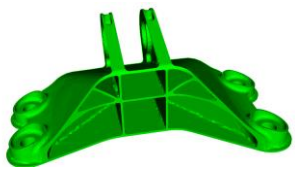
- デザイン形状と反りの比較
 - デザイン形状
 - 成形形状（反り予測を反映させた形状）



- Digimat-AMで反りに対する形状補正を最適化しておくことで、実機による整形を初回から寸法精度を向上させます。

Digmat-AMによる反り予測

Digmat-AMによるシミュレーションによる最適化ワークフロー



反り補正形状によるシミュレーションを
繰り返すことで最適化

- 効率的な最適化プロセス
 - 1時間以内に1回の最適化ループを実施可能

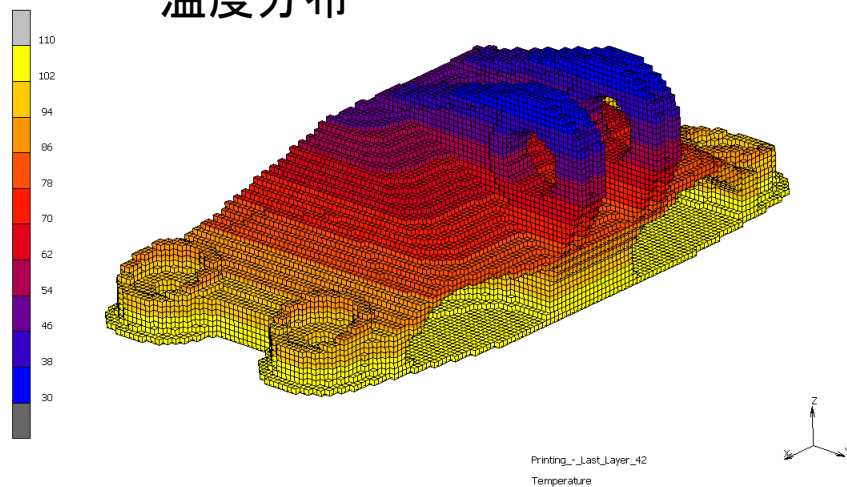
Digimat-AMによる反り予測

Digimat-2018 新機能

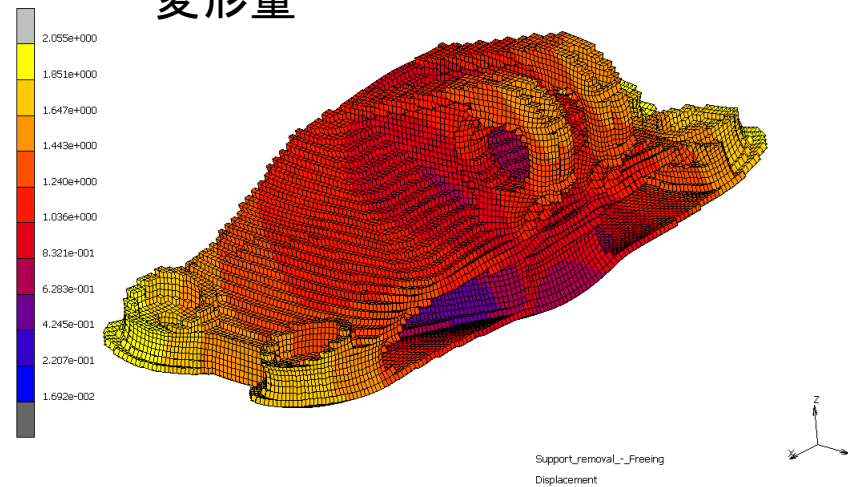
- チャンバー内の局所的な温度分布を考慮

Inc: 42
Time: 4.200e+001

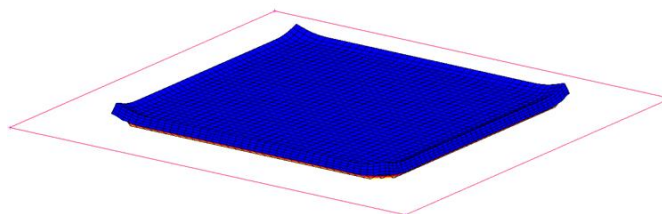
温度分布



変形量



- サポートの破壊・剥がれ



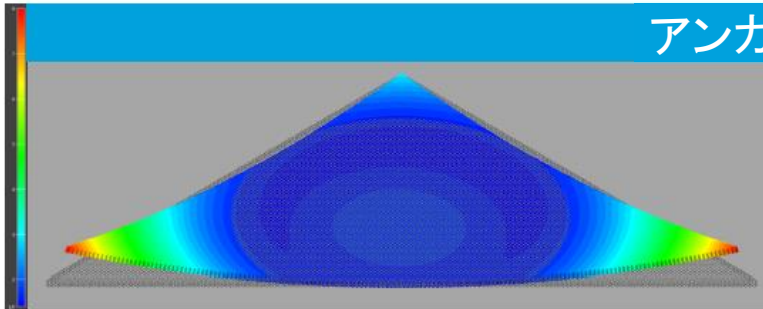
Digimat-AMによる反り予測

Digimat-2018 新機能

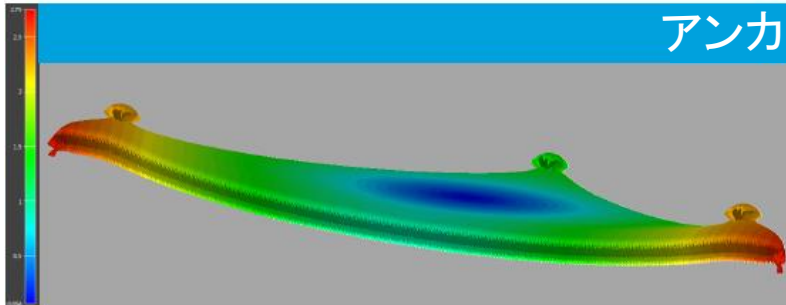
- アンカーピンの効果を考慮



アンカーピン無し



アンカーピン有り

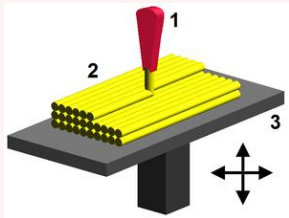


Digimat-AMによる構造解析

Digmat-AMによる構造解析

従来の短繊維強化プラスチックの同様のワークフロー

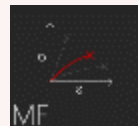
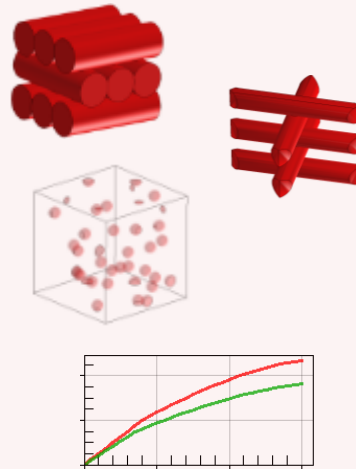
構造メッシュへの プロセスデータの適用



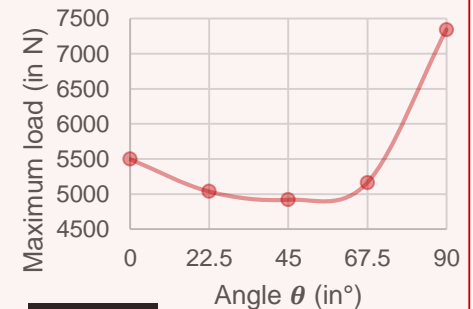
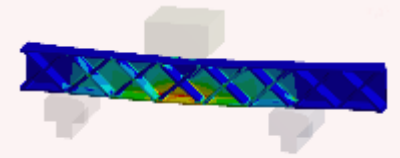
- 残留応力
- プリント方向
- 空隙
- フィラーによる微細構造



マルチスケール 非線形材料モデル



製造時の部品性能



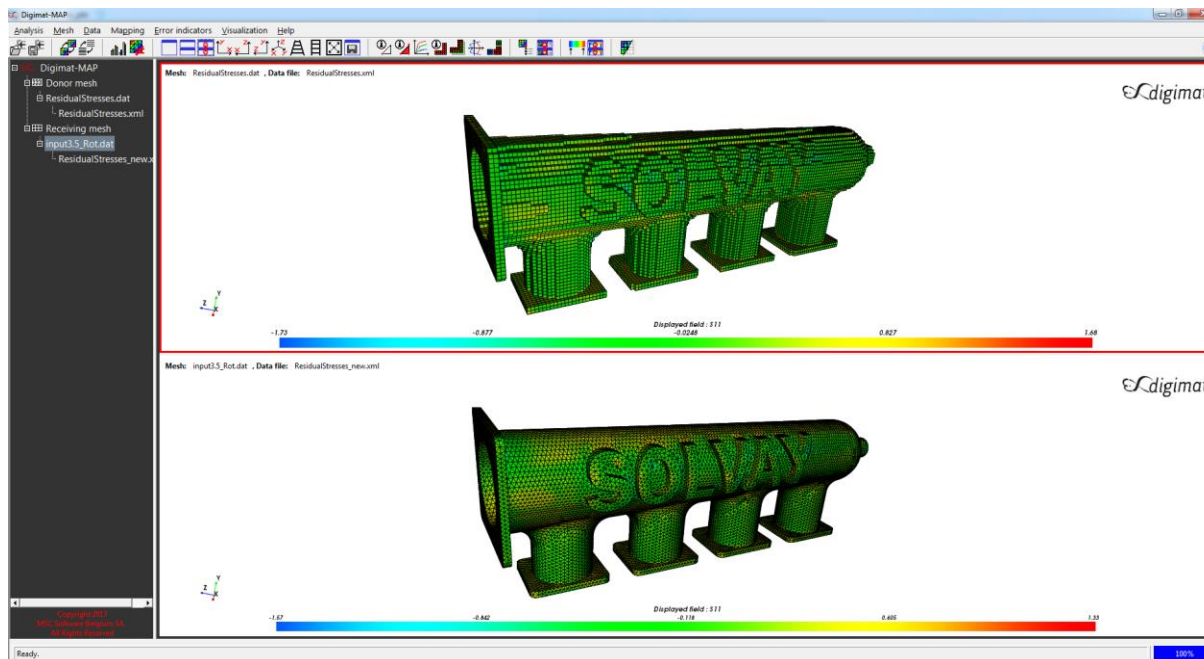
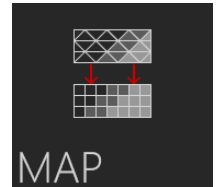
連成

Digmat-AMによる構造解析

Digmat-MAPを用いたDigmat-AMで生成された残留応力のマッピング

積層造形は製造時において次の影響を受けます。

- 残留応力(SLS/FDM)
 - Digmat-AMによる計算結果から取得可能
 - メッシュの読み込み
 - 初期応力として読み込み



Digmat-AMの結果



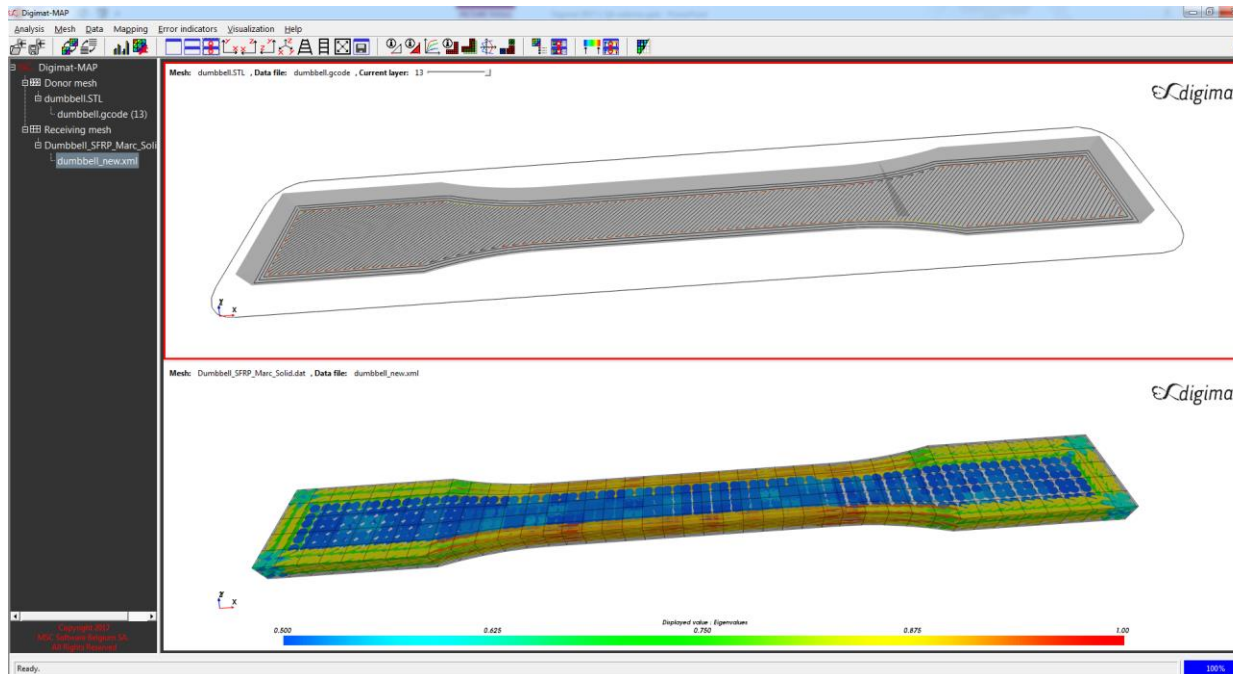
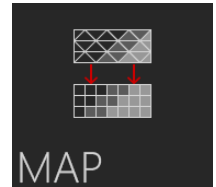
初期応力として
構造メッシュにマッピング

Digmat-AMによる構造解析

Digmat-MAPを用いたDigmat-AMで生成されたツールパスのマッピング

積層造形は製造時において次の影響を受けます。

- ツールパス(FDMのみ)
 - Slicing softwareで取得可能
 - *.stl(形状)の読み込み
 - *.gcode(ツールパス)の読み込み



層ごとの詳細な情報



均質化された等価な
繊維配向

→ *.dofファイルに出力可能

Digimat-AMによる構造解析

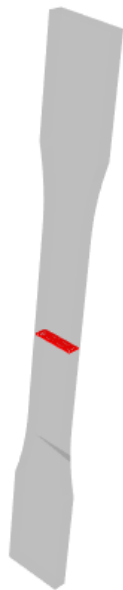
FDMのツールパスの構造解析への影響

ツールパス

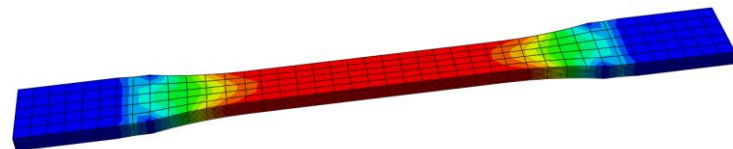
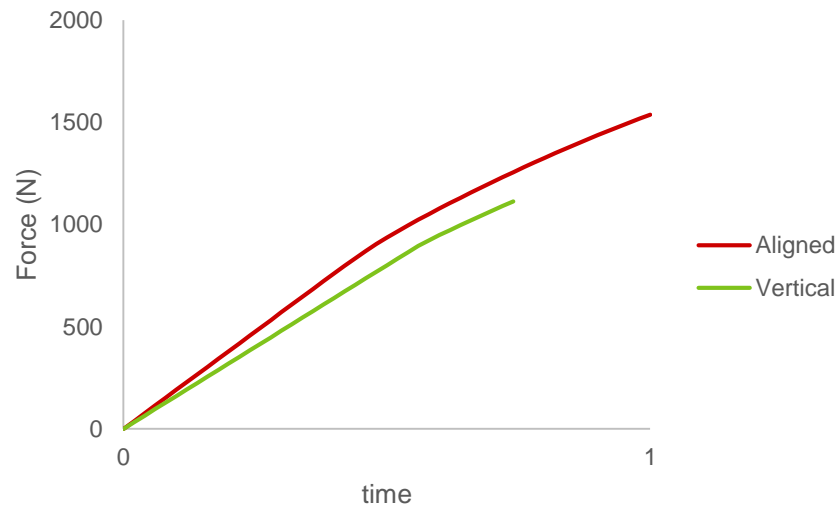
+/-45° infill / Printing Z / Loading X



+/-45° infill / Printing Z / Loading Z



構造解析による引張試験シミュレーション



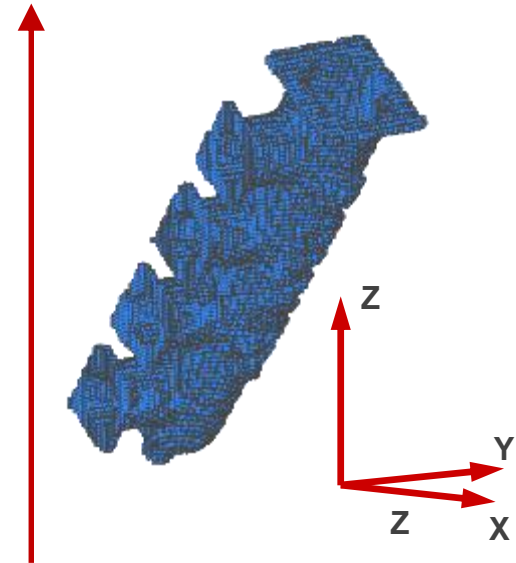
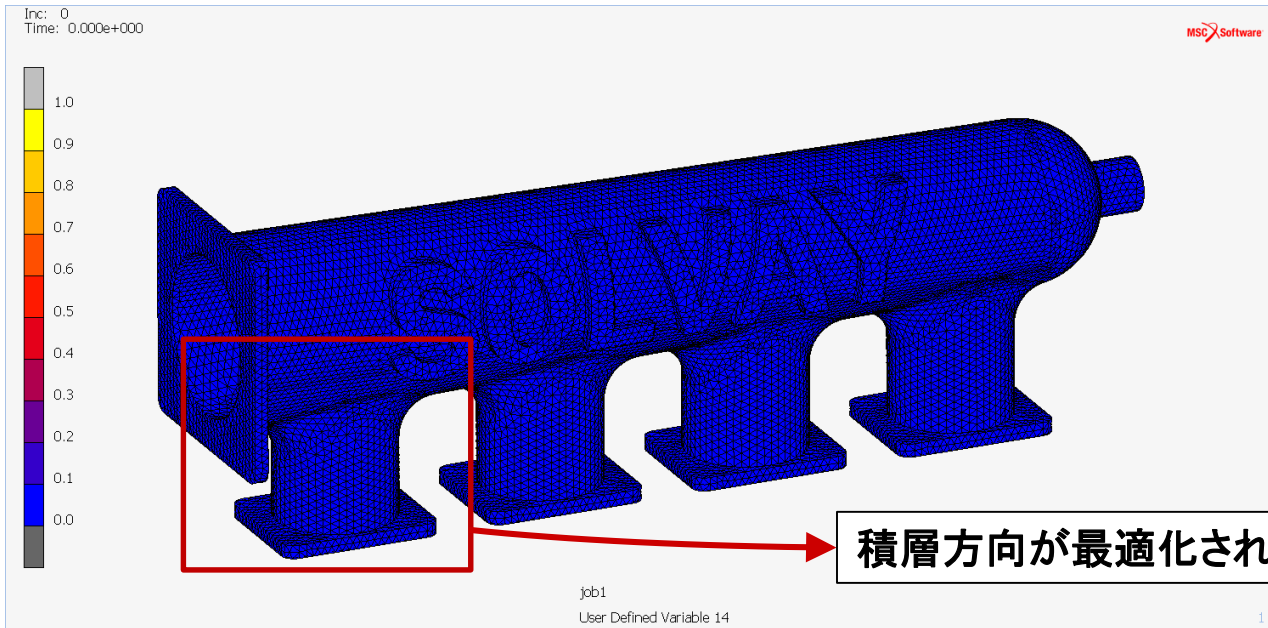
Digmat-AMによる構造解析

SLSの積層方向の構造解析への影響

Failure indicatorによる積層方向を考慮したときの製造の影響

→ プリント方向の検証によって最大圧力によるプリント方向の最適化

積層方向を変えてシミュレーションし、
最適な積層方向を検証



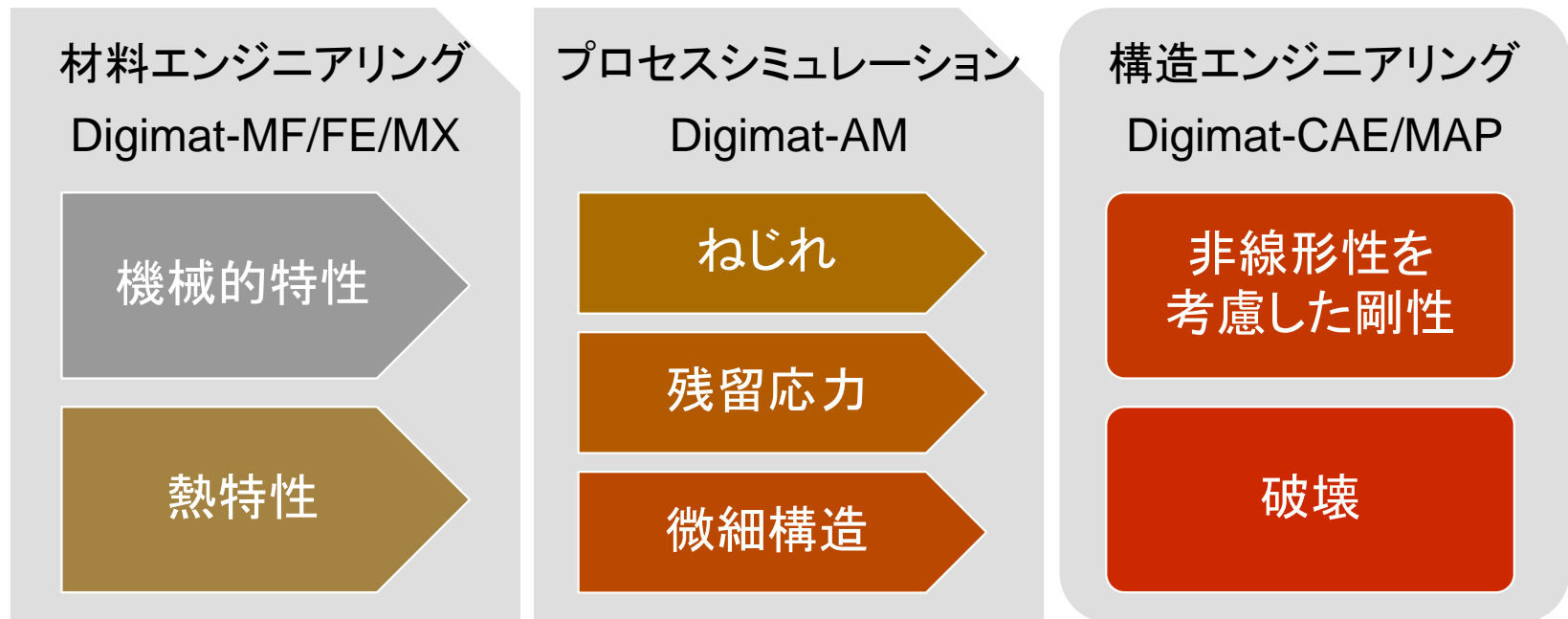
最適化された積層方向は…
X軸周りに5° 回転
Y軸周りに35° 回転
(積層方向はZ方向)

積層方向が最適化されていない

破壊に至るまでの破壊指標の分布
(Marc)

Digimat2017.1によるポリマー積層造形の挑戦

- Digimatによる複合材料構造解析のワークフローの応用
- Digimat-AMによるプロセスシミュレーションの開発



補遺

Digimat-AMのインプットパラメーター

- SLS Printer
 - Chamber size(X,Y,Z) [mm]
 - Layer thickness [mm]
 - Chamber temperature [°C]
 - Laser power [mW]
 - Convection coefficient [mW/(mm²°C)]
 - Scan spacing [mm]
 - Recoating time [s]
 - Scan speed [mm/s]
 - Beam diameter [mm]

補遺

Digimat-AMのインプットパラメーター

- FFF Printer
 - Chamber size(X,Y,Z) [mm]
 - Toolpath (G-code format)
 - Chamber temperature [°C]
 - Extrusion temperature [°C]
 - Bead width [mm]
 - Draw speed [mm/s]
 - Convection coefficient [mW/(mm²°C)]

補遺

Digimat-AMのインプットパラメーター

- Mechanical

- Specific volume [mm^3/t] (樹脂のみ要温度依存性)
- Young's modulus [MPa] (樹脂のみ要温度依存性)
- CTE [$^{\circ}\text{C}^{-1}$] (樹脂のみ要温度依存性)
- Poisson ratio

※以上、樹脂と強化材、それぞれについて必要

補遺

Digimat-AMのインプットパラメーター

- Thermal

- Specific heat capacity [mJ/(t°C)] (樹脂のみ要温度依存性)
- Thermal conductivity [mW/(mm°C)] (樹脂のみ要温度依存性)
- Melting temperature [°C] (SLS用材料のみ)
- Crystallization temperature [°C] (SLS用材料のみ)

※以上、樹脂と強化材、それぞれについて必要

- Emissivity

補遺

Digimat-AMのインプットパラメーター

- **Microstructure (SLS用材料のみ)**
 - Powder diameter [mm]
 - Powder conductivity [mW/(mm°C)]
 - Tapped powder density [t/mm³]