

## なぜビルドプレート温度は最適化されなければならないのか？

### 反りの原因は？

FDM型3Dプリンターの造形プロセスでは、フィラメントを溶かして、ビルドプレートまたは造形中の材料の下層に積み上げるようにフィラメントが積層されてゆきます。ノズルから出たフィラメントは急速に温度が下がります。

さらに各レイヤーは異なる速度で冷却され、造形が進むとともに、造形物各所で不均一に温度差が生じます。フィラメント用の素材は温度変化に伴って収縮する材料がほとんどで、不十分な接着による反りおよびビルドプレートからの剥離することで造形が失敗になる多くの問題をもっています。

反りのタイミングは、造形物が角から持ち上がり、横方向に変形し始めるときです(図2)。

極端な場合、反りによって印刷物がプリンターから完全に分離されますが、軽度の場合でも、寸法精度が失われるため、用途によっては部品が使用できなくなる可能性があります。反りの程度は多くの要因に依存し、いくつかの素材は他の素材よりも反りやすい傾向があります。言うまでもなく、印刷を成功させるには、この有害な影響をできるだけ避ける必要があります。

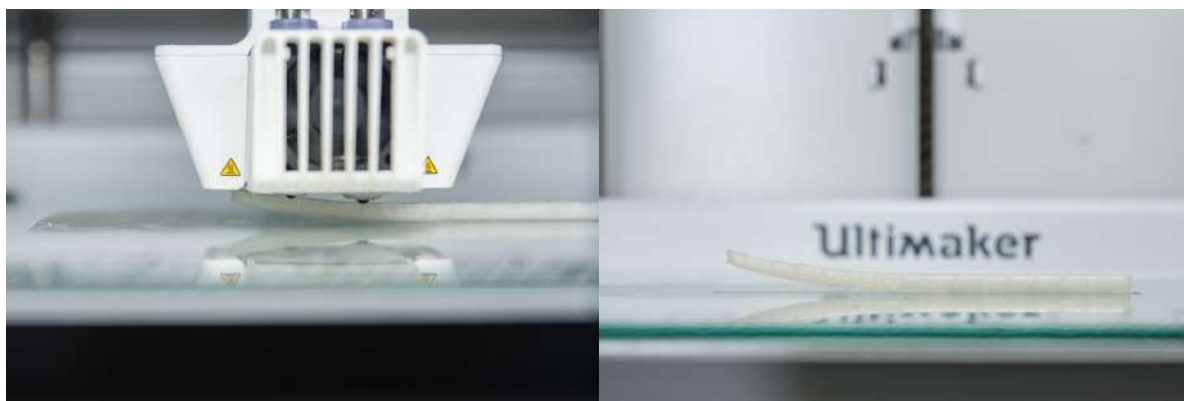


図2: ナイロンフィラメントの実験。造形物の向かって左側半分には通常の接着剤スティック、右側半分にはMagigoo PA接着剤を使用しています。

反りの原因は、連続する各印刷層の熱収縮の違いに起因する可能性があります。

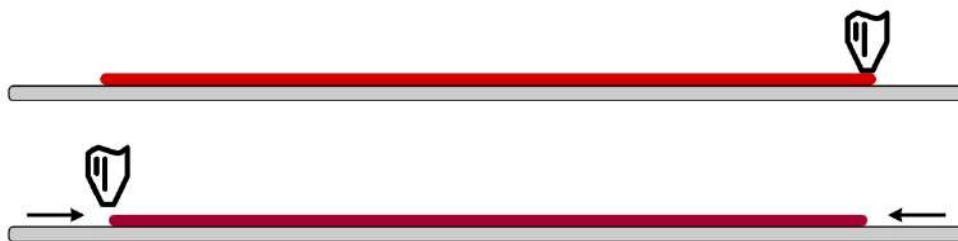


図3: 第1層

1. 最初の層がビルドプレート上に押し出されると、ビルドプレートの温度まですぐに冷却が開始され、これにより最初の層がわずかに収縮します(図3)。



図4: 第2層

2. 第2層は、すでに収縮している第1層の上に堆積しますが、冷却しながら、第1層の上に収縮します。上層が堆積されると、下層はすでにわずかに収縮しているため、上層によって下層が圧縮されます(図4)。



Figure 5: Print warp due to thermal gradient

3. このプロセスは、新しいレイヤーが追加されるにつれて繰り返され、下のレイヤーの横方向の圧縮が増加します。これにより、積層間の全体的なせん断力が生じ、これを反り応力と呼びます。

反り応力が部品の剛性とベッドの接着力よりも大きい場合、プリントの底部は必然的にビルドプレートから引き離され始めます。(図5)。

反りの量は、材料特性や印刷条件など、互いに独立していないいくつかの要因に依存します。印刷物の反りの量を支配する最も重要な材料特性の1つは、CTE(熱膨張係数)です。CTEは、温度が変化すると材料の形状、面積、体積が変化する傾向を示します。

線形CTEの数値が高い材料は、温度変化で長さ方向に大きな変化を示します。結果として、CTEが高い材料は、FDM方式の3Dプリンターにおいて造形中にCTEが低い材料よりも反りやすくなります。

CTEに加えて、冷却中の材料の結晶化度の変化を考慮する必要があります。PPやPEEKなどの結晶材料は、熔融状態から冷却すると結晶化します。結晶構造はより密に詰まる傾向があるため、結晶化は潜在的に高い収縮率をもたらす可能性があります。

材料の結晶化はいくつかの要因に依存し、独自の学術的議論に発展するほど複雑です。この時点で、PP、一部のナイロン、PEEKなどの結晶材料はアモルファスプラスチックよりも反りやすいと考えるだけで十分です。

## 反りを制御するには

反りを防ぐ解決策は、最初の層とビルドプレート間の接着力が、最初の層の熱応力よりも大きいことが必要です。プリントの反りは、ビルドプレートの接着と温度勾配を制御することで軽減できます。最初の層の接着は、次のようないくつかの要因に依存します。

- ビルドプレート材料
- 使用される接着剤
- 印刷される素材の種類
- ビルドプレート温度
- ノズル温度
- 第1層の印刷速度
- 第1層の射出量

一般に、ベッド温度、ノズル温度、および第1層目の射出量が多く、第1層目の造形速度が遅い場合、第1層目の接着力はより強くなりますが、これらの設定はプリンター、素材、環境の組み合わせに大きく依存します。

造形中の温度勾配の適切な制御は、熱応力を減らすことで反りを減らすことに役立ちます。これは一般に、印刷される材料のガラス転移点よりもわずかに低い内部ビルド温度(10°-20°C)を維持することによって達成されるわけではありません。

ガラス転移温度は、熱可塑性材料がゴムのように作用し始める温度、またはそれより下では、材料が硬い「ガラス状」状態にある温度範囲です。わかりやすく言うとガラス転移温度より下では、材料は硬くて強いが、この温度より上では、材料はより柔らかく、硬くないということです。これは、ガラス転移温度に近いほど、熱可塑性樹脂が柔らかいため、熱応力が低くなることを意味します。

FDMフィラメント材料の大部分のガラス転移温度はかなり高く、加熱され密閉されたチャンバーを装備したプリンターを使用しない限り、材料のガラス転移点を維持することは不可能です。それにもかかわらず、チャンバー内を一定の温度に保つことは、この問題を防ぐための鍵であり、印刷中の急激な温度変化を防ぐことが常に求められます。

ナイロンやABSなどのエンジニアリング材料は、加熱ベッド付きの密閉型プリンターで簡単に造形できます。十分な強度のビルドプレート接着剤が使用されている場合、プリンターの内部温度を十分に高く維持して反りを緩和するには、加熱されたベッドで十分です。

一方、無垢なPC、PEEK、Ultem、PPSUなどの高温材料は、印刷中の熱応力を軽減するために加熱されたチャンバーを必要とします。

熱応力に影響を与える他の要因には、層の高さ、印刷速度、シェルの厚さ、および充填率があり、値が高いほど一般に反りが大きくなります。

上記の情報を見ると、ビルドプレートの温度を可能な限り上げるだけで、反りの問題をすべて解決できると思うかもしれませんが、残念ながら、これはほとんどのFDM材料には当てはまりません。ビルドプレートの温度を上げすぎると、次の3つの大きな問題が発生する可能性があります。

1.最も明らかな問題は、ビルドプレート上の造形樹脂が柔らかすぎるために印刷品質が低下することです。これは通常、鋭いエッジが丸くなってしまい、部品の変形につながります(図6)。



図6:PLAを使用した造形サンプルとして有名なBenchyです。左の画像は60°Cに設定された加熱ベッドで印刷されたベンチを示し、右の画像は80°Cで印刷されたベンチを示します。右側は反り、また、過度の熱により層が丸まることによる造形精度の低下も示しています。

2.印刷の高さが増加し始めると、印刷の底部、すなわち最初の数ミリメートルまたはセンチメートルの材料は、ベース部分の影響を食い止めるために、新たに堆積した層からの熱応力を止めるのに十分硬くなければなりません。(図7)

ビルドプレートの温度が高すぎる場合、印刷物のベースが柔らかく、印刷物の上にある層がベースを引っ張ることを意味します。このことは硬質の素材と柔軟な素材を比較することで明確になります。

ABSやPCなどの剛性材料は通常は反り続けません。プリントが特定の高さに達すると著しく反らなくなります。一方、PPやナイロンなどの柔軟な素材は、ビルドプレートの接着力が十分でない場合、印刷が進行しある高さに達すると、大きく反りはじめます。

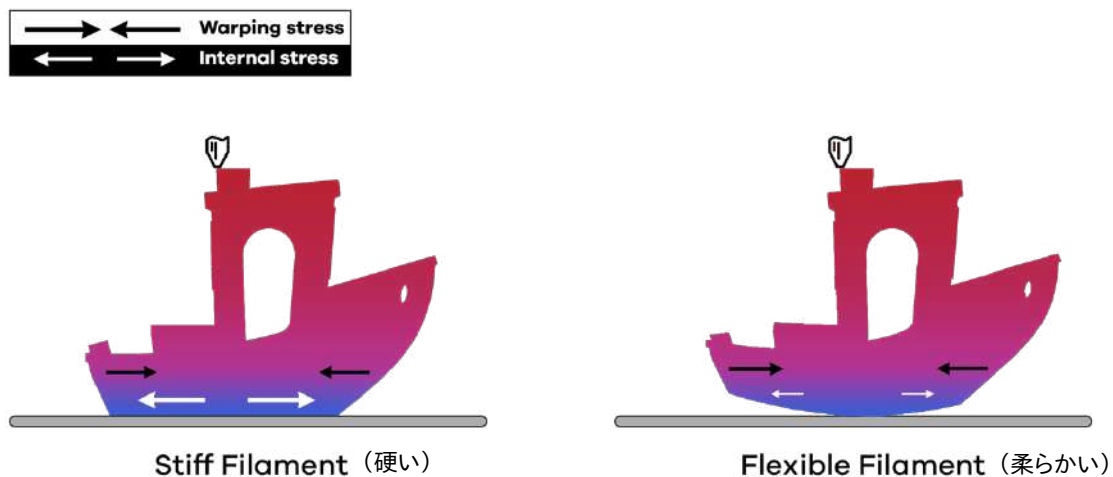


図7: 硬い素材と柔軟な素材の両方で印刷すると、硬い素材は反り応力に耐えることができます。これは、印刷の下部にあるより冷たい素材がさらなる反りに耐える十分な強度(内部応力)を持っているためです。柔軟なまたは柔らかい素材は、プリントの最上層の収縮によって引き起こされる反り応力に耐えるほど強くありません。

3.別の要因は、接着剤の性質に関連しています。より高い温度では、プラスチックと接着剤の間の接着力は通常大きくなりますが、接着剤層の実際の強度は低下し始めます。ほとんどの接着剤やビルドプレートの表面は、温度が上昇すると軟化するポリマーでできています。結果として、印刷される部品の反りが最小になる各材料の温度範囲が存在します。この範囲では、最初の層の接着が最大になり、接着剤の強度も最大になり、熱応力と反り応力が最小になるという妥協点があります。一部の素材では、この最適範囲が広い場合がありますが、最も困難な素材の場合、最適な印刷温度範囲は5~10°Cの範囲内です。

これらの理由により、Magigoo®接着剤で最高の性能を発揮するには、3Dプリントシステムでの最高の印刷温度を決定することが重要です。