

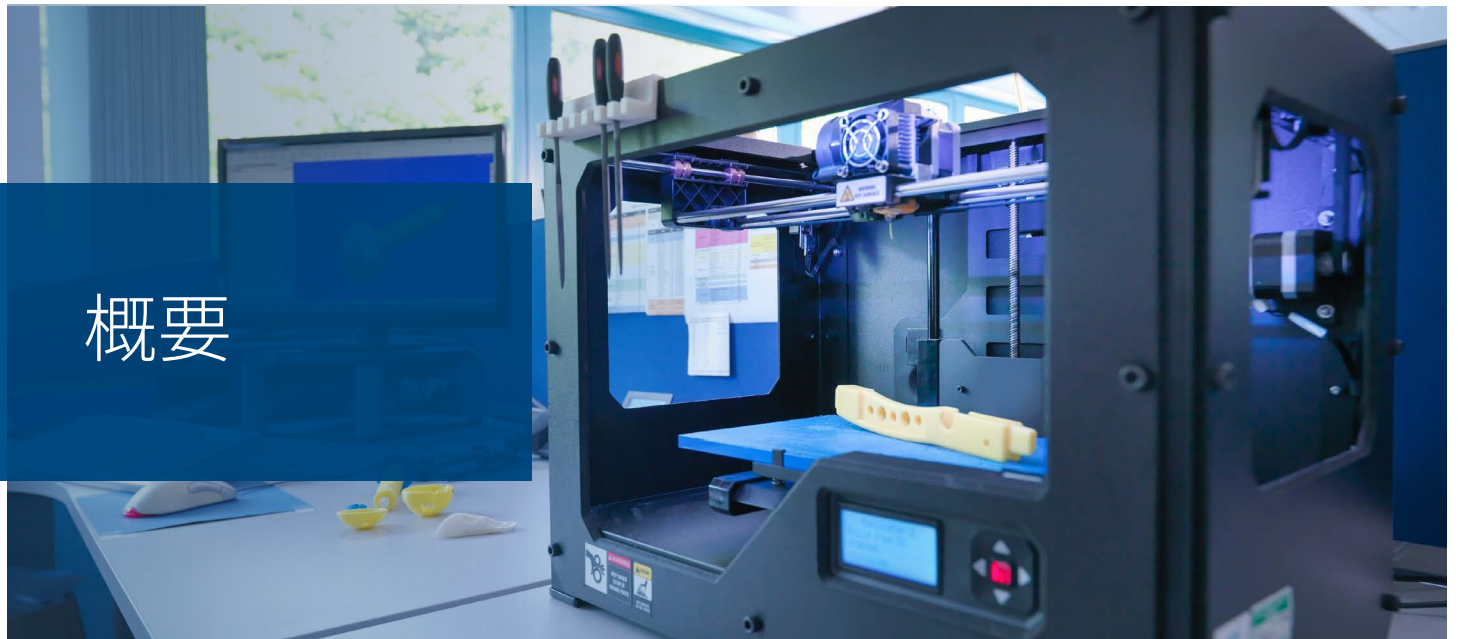
3Dプリンティング用 プラスチックの認証

ULにおける3Dプリンティング用プラスチックに関する研究

Empowering Trust™



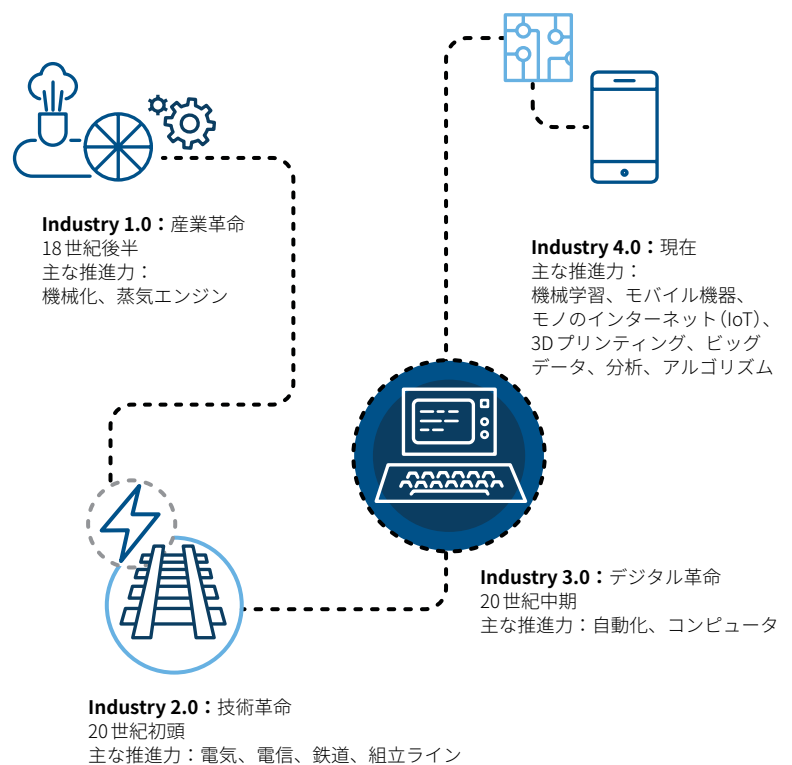
概要



3D プリンティングまたは付加造形(AM)は、21 世紀を担う創造的破壊技術の一つであり、3D プリンティング製品の需要は2025年¹までに約500億ドルに達すると予想されている。また、Industry 4.0の構成要素としても挙げられ、製品の開発／製造革命の最前線を担う技術であると考えられている。

3D プリンティングは、デジタルファイルから直接複雑な部品や製品を製造することができ、従来なかった柔軟性を実現可能である。また、造形パラメータは途中で変更可能であるため、材料の特性を調整することで、精巧な形状を作り出すこともできる。この優れた柔軟性は、従来の製造方法にはなかった新たな複雑さを伴っており、その技術にはまだ未知な部分が多い。この柔軟性が材料や性能の特性に与える影響を知ることは、製品の設計・開発において重要な要素である。3D プリンティングで造形したパーツの性能に信頼性が確保できなければ、製造者にとって大量生産へと歩を進めることは容易ではない。

3D プリンティングは、製品開発者にとって、設計の自由度が広がる反面、新たな評価を伴う必要がある。これは、選定する材料や造形プロセス、プリンタ自体の機能などの相互作用から生じるものであり、製品の品質と安全性に関して、独立した第三者認証が必要とされる。





UL 94 プラスチック材料 の燃焼性試験 (The standard for Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances) :

UL 94 の要求事項は、機器・製品の部品に使用されるプラスチック材料の燃焼試験を対象としており、特定用途の燃焼性に関しては、許容性を示す予備的な指標となる。また、校正した実験室の条件下で、小さな直火または放射熱源を用いて、機器や製品で使用する材料の燃焼特性を評価し、記録することのみを目的としている。

UL 746A プラスチック 材料の短期物性評価 (The Standard for Polymeric Materials-Short Term Property Evaluations) :

UL 746A の対象とする要求事項は、電気製品の特用途に使用される部品のプラスチック材料の短期評価である。本規格では、プラスチック材料の物理的 / 電氣的 / 機械的 / 熱的、さらに燃焼性などの特性を評価する。また、プラスチック材料製造者、成形業者、最終製品業者、安全技師、その他の関係者にガイダンスを提供する。

UL は、3D プリンティングで造形した部品・製品から要求される幅広い性能要求に対応するため、2017 年に 3D プリンティング用プラスチック認証プログラム(ブルーカード)を導入した。これは、3D プリンティング用プラスチック材料の認証プログラムであり、具体的には、ブルーカードは、自動車から家電製品などの最終製品で使用する 3D プリンティング材料・コンポーネントを、事前に選定しやすくするためのデータを提供する。これにより、品質、安全性、一貫性、性能の観点から、3D プリンティング製品のユーザーとプラスチックサプライヤーの両方に、サプライチェーン全体での信頼をもたらす。このブルーカードプログラムでは、3D プリンティング用のプラスチックに対して UL の要求事項を評価する。さらに、3D プリンティング製品に必要な追加の認証要求事項を提供し、監査を実施することにより、UL の要求事項に対し継続的に適合していることを確認する。

このホワイトペーパーでは：

- ・ 造形方法によって、成形品に与える影響について解説
(3D プリンティングと射出成形の比較)
- ・ 熱溶解積層法による 3D プリンティングが、安全上重要な性能特性に及ぼす影響を調査した UL の R&D での研究の概要を紹介
- ・ ブルーカードプログラムで得られた知見について説明
- ・ ブルーカードプログラムによる大量生産への 3D プリンティング技術の導入について説明

はじめに

3D プリンタでの造形物は、射出成形など従来の方法による成形品と比較して、引張強度や衝撃強度などの機械特性に与える影響が大きいというのは、AM 業界で周知の事実である。しかし、着火性、燃焼性、絶縁強度など安全上重要な材料の性能特性にも影響があることは、十分理解されているとは言い難い。

そこで UL のプラスチック R&D チームは、システムチックなアプローチにより知見を集積した。UL R&D チームは、3D プリンティングにおけるパラメータが、安全上重要な特性、特に UL 94 の燃焼性試験、並びに UL 746A の短期物性に与える影響を検証し、データを収集した。さらに、射出成形サンプルとの比較評価も実施した。

この研究の結果が、3D プリンティング用プラスチック認証プログラム(ブルーカード)の開発へと導いた。ブルーカードプログラムにより、3D プリンティングに使用される樹脂材料並びに 3D プリンティングで造形された製品の安全性と適性の認証に必要な要求事項が示され、AM 業界にとって重要な情報の第三者認証が可能になった。

プラスチック認証：プラスチック認証とは何か、なぜ認証が必要か？

このブルーカードプログラムの必要性を理解するために、ULのプラスチック認証プログラム(イエローカード)が最初に開発された背景を解説する。



UL 認証コンポーネントマーク

UL 認証コンポーネントマークは、大型製品やシステムの構成部品に付与される認証マークで、消費者が目にすることはほとんどない。スイッチや電源、プリント配線基板、産業用制御機器などの幅広い製品に付与されており、現在では3D プリンティングコンポーネントにも使用されている。認証された製品や材料は、最終用途の許容範囲内で、適用規格に準拠していることを発信することができる。

以前は、製造業者が製品の業界規格に準拠していることを検証する必要がある場合、製品で使用されている材料を、第三者の試験機関に提出して、試験と検証を行う必要があった。製造業者は、同じ材料を他の製品で使用するたびに、再び特性試験を実施することに疑問を呈していた。この検証プロセスは、時間と費用を要する。製造業者は、製品を安全かつ迅速に市場に投入するためにより良い方法を求めている。

そこで、ULは業界からのニーズに基づき60年ほど前にプラスチック認証プログラムを開始した。プラスチック認証プログラム(一般にイエローカードプログラムとして知られている)は、

一般的な製品種別に使用されている多くの材料を試験している。プラスチック材料は、機械的、電氣的、火災、および発火の安全性を含む様々な特性について評価される。以前は、プラスチック材料の各特性評価の結果は、「イエローカード」として公開された。現在、イエローカードはデジタル化され、ULProspector®とProduct iQ™材料データベースに公開されている。

ULイエローカード認証プログラムは、プラスチック製品が特性認証を満たしていることを証明する、世界的に認められた樹脂材料安全プログラムへと発展してきた。現在では、47,000を超える材料に対して、信頼できる第三者認証を提供し、製造業者が自

社製品で使用している承認済み材料の冗長な性能試験を排除することで、評価プロセスの簡素化を実現できる。

このプレセクションプロセスによって、製品認証プロセス全体がより簡単に、迅速に、そしてより費用対効果を与える。今日のように急速に変化する競争市場では、市場参入が難しくなっているため、その対応が複雑化している。



UL プラスチック認証プログラムは、プラスチック製品の一連の性能評価プログラムとして、世界的に認められている。これらの認証情報は、ULProduct iQ™ データベースで公開されており、多くの設計者、エンジニア、サプライヤーがすでに評価／認証された材料を探索している。このデータベースは、製品認証プロセス全体がより簡単、迅速になり、より多くの費用対効果の向上に貢献している。



ポリマーの絡み合い理論は、よく分散した状態のポリマー分子が、物理的にどのように絡み合っているかを説明している。絡み合った分子構造により、ポリマー鎖間に機械的応力が伝達され、堅牢な構造を形成する。絡み合いの少ないポリマー鎖は、応力を効率的に伝達できないため、構造的に弱い個所ができる。

プラスチック認証のメリットは？

プラスチック材料製造業者：認証を取得した材料が、ULProspector®とProduct iQ™材料データベースに公開されると、安全性や性能の要求事項を満たす材料・コンポーネントを探している多くの設計者、エンジニア、購買担当者、サプライヤーは容易に確認できる。

最終製品の製造業者：最終製品やシステムの認証を取得する際、UL プラスチック認証プログラムを利用することで、時間と費用を削減することが可能である。また、認証を受けた材料は、UL のフォローアップサービスを受けることにより、製品の認証評価を継続的に対応することにより、製品がULの安全性と性能の基準を満たしていることを確認できる。

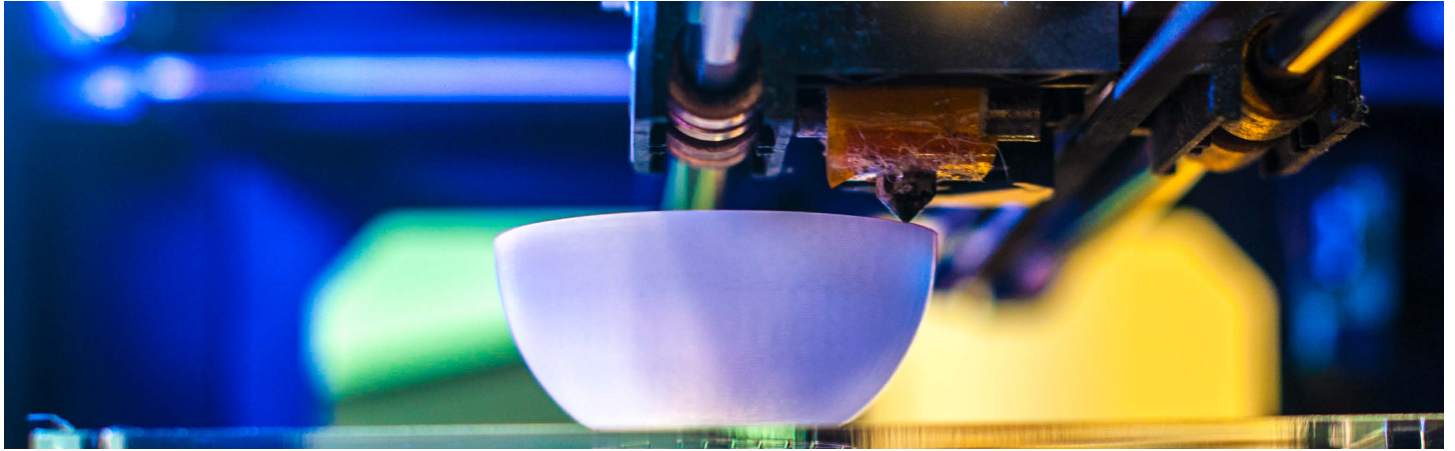
成形業者・サービス提供者：UL 3D プリンティング認証材料を使用することで、認証が必要な製品の市場参入が可能になり、3D プリンティングにおけるサプライチェーンでの品質の確保に貢献できる。

3D プリンティングと射出成形

プラスチック認証プログラムは、認証材料の特性が、最終製品に要求される材料の特性を満たしていることが必要である。これは、認証された材料の試験サンプルは、最終製品と同等の製造プロセスで造形されており、品質も同等であることを示唆する。認証により、試験サンプルと最終製品に相違はないこと、並びに、試験サンプルの樹脂は、最終製品の樹脂と同じ熱的/物理的履歴を経ていることが確認できる。

射出成形、および、熱溶解積層法の3D プリンタで作製した同サイズの2つのサンプルを比較評価した結果、射出成形品の密度は全体的に均一だったが、3D プリンタで造形したサンプルには、ばらつきが見られた。3D プリンティングでは、ボイド(気泡)や溝が目視された。これらのボイドは造形中に発生したものである。さらに、射出成形品の表面はなめらかであるが、3D プリンティング造形品は、表面をなめらかにするための研磨などの工程が必要である。

3D プリンティングと射出成形では、ポリマー分子にどのような影響があるのか、また、この成形方法の違いが材料の性能にどのような影響を与えるのかを解明するため、高分子化学、特に、ポリマーの絡み合い理論についても考察した。



射出成形においては、ポリマーは十分に混合された後、金型に射出し、冷却されるため、絡み合った分子構造のまま凝固する。一方、熱溶解積層法の3Dプリンティングでは、十分に混合・融解されたポリマーを次から次へと押し出して積層していくことで造形される。ポリマーは、射出成形品のように絡み合った状態で積層され、つまり、ラスタ（造形層）方向に負荷を伝播していく。しかし各層の層間のポリマー鎖は、分子の移動性や拡散時間によって絡み合ったままの状態やそうでない状態のものがある。同様に絡み合い制限は他の3Dプリンティング造形方法でも見られる。

ポリマー鎖の絡み合いには、十分な時間や熱エネルギーが必要であり、それらが不十分なまま3Dプリンティングで造形されると、よく混練された条件と比較した場合、各層間の接触面の構造が弱くなる。これにより、機械的強度が欠陥する要因になることがある。

引張強度の変化とポリマーの絡み合い

ULは、これらの3Dプリンティングでみられるボイドおよび均一性に欠ける表面形状が材料の機械特性や構造に及ぼす影響について検討していた。この研究結果は、2002年発行の Rapid Prototyping Journal で発表した。ABS樹脂を熱溶解積層法の3Dプリンタで造形したサンプルの引張強度は、プリンティング方向、つまり、垂直方向が水平方向より5倍以上優れていること、また、同サイズの射出成形サンプルに比べ、桁違いに低いことが明らかになった。

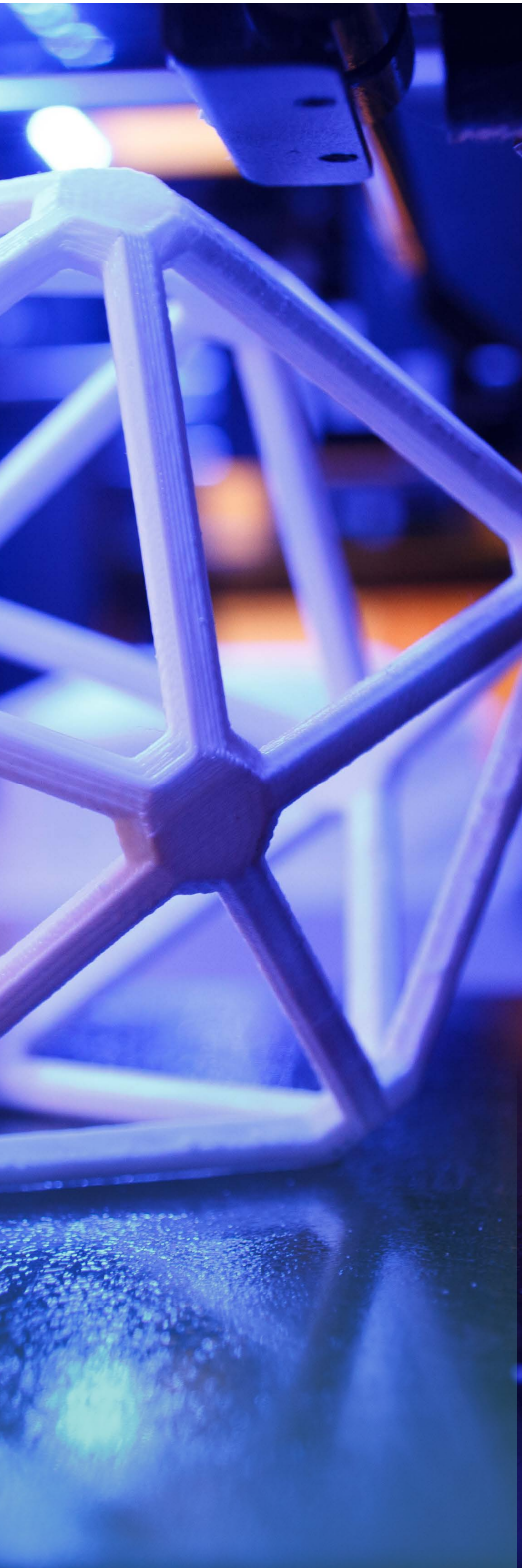
3Dプリンティングと射出成形で作製したサンプルに見られるこの違いは、ポリマーの絡み合い理論で容易に考察できた。



射出成形品



3Dプリンティングサンプル断面



性能特性の変化

3D プリンティングが、引張強度などの機械特性³に与える影響については多くの報告があり、一方で、安全上重要な性能特性に与える影響についての研究報告は少ない。例えば、射出成形で作製した試験片は、局所的な密度のばらつきがほとんどみられない。熱溶解積層法で3D プリンティングで造形した試験片は、各層間にボイドや隙間があり、それらが各層の表面に現れ、スムーズではない。この違いが、材料の性能特性に次のような影響を与えている。

1. 3D プリンティング中に生じたボイドや隙間の中にある空気は、ポリマーとは異なる誘電特性を有しているため、電気絶縁体として機能する可能性がある。
2. ボイドが断熱材として機能すると、表面の熱量が低下し、難燃性が低下する可能性がある。
3. サンプル表面密度が高いため、炎の伝播を加速し、サンプルの難燃定格が低下する可能性がある。
4. 垂直方向に延びた溝が煙突効果により、サンプル内部の熱分散が変わり、空気の流入によって難燃性が低下する可能性がある。

問題は、3D プリンティング用プラスチック材料の評価・認証

3D プリンティングにおける物性・特性の相違、および、これらの相違に対する理解の欠如が、深刻な問題を引き起こした。ULのプラスチック材料の認証プログラムには、3D プリンティング用材料認証は含まれていない。製品の製造者は、自社の製品に使用可能で安全な3D プリンティング用プラスチックをどのように判別できるのだろうか？ 3D プリンティング用プラスチック材料のユーザーのリスクを削減し、安全を確保するためのソリューションが必要なのは明白である。

当初は、3D プリンティングに関する包括的な試験/分析例はなく、製造業者がこの基本的な疑問に回答する術はなかった。3D プリンティングの新しいプラスチック認証プログラムを作成するために必要な情報を取得するために、基礎研究を実施する必要があることは明白であった。それを始めたのがUL R&Dチームである。



研究課題

プラスチックと火災について国際的に著名な研究者である、ULのDr. Thomas Fabianは、3Dプリンティングがプラスチック材料や性能特性に与える影響についての知識が

不足していることを認識し、14か月にわたる調査研究を行った。研究の目的は、UL 94およびUL 746Aの材料特性に対する様々な3Dプリンティングと造形パラメータの影響を検証し、その結果を射出成形で作成されたサンプルで得られた結果と比較した。

この研究は、「UL 94およびUL 746Aの材料特性に対する熱溶解積層法による3Dプリンティングの影響」と

題した、64ページのテクニカルレポートで報告し、3Dプリンティング用のプラスチック材料の認証ガイドラインを作成するために必要な予備知識を提供した。また、3Dプリンティングで造形された部品と、従来の射出成形品や押出成形品との性能の違いに対応する要求事項を作成するため、そのガイドラインとしても活用されている。



ULの 3Dプリンティング 検証プロジェクト

この検証プロジェクトでは、3D プリンティングで造形された部品の性能に最も影響すると思われる4つの材料造形パラメータと造形条件の影響を検討した。造形オリエンテーション、エアギャップ、造形条件、層の厚さ(プリンタのノズルのサイズによる)で、電子・電気機器によく使用されている2種のプラスチックを使用し、異なるパラメータを系統的な組み合わせで3D プリンタによって試験片を造形した。絶縁強度、体積抵抗率、ホットワイヤ発火性(HWI)、比較トラッキング指数(CTI)、高電流アーク発火性(HAI)と、UL 94 Vの燃焼性を評価した。さらに、同材料を使った射出成形サンプルと比較評価した。

材料：

2種類の市販プラスチック材料の試験サンプルは、従来の射出成形と3D プリンティングによって作成した。

1. 難燃性ABS：UL 94 V-0 難燃定格を持つABSフィラメント
(色：黒、φ2.85 mm)
2. PEI：ポリエーテルイミドフィラメント
(色：ナチュラルカラー、φ2.85 mm)

難燃性ABSの試験片は、一般向けデスクトップ型3D プリンタ、PEIのサンプルは工業グレードとしてよく使われている3D プリンタを使って造形した。

材料の調製： 熱履歴

研究結果をより精密なものにするために、さらにチームは1つ因子を追加した。ドイツのクレーフルトのUL 材料試験所で、厳格な結果を得るために、3D プリンティングに使用したフィラメントをペレットサイズに切断、乾燥し、射出成形した。すなわち、射出成形サンプルも、3D プリンティングされたサンプルと同じ樹脂を使用して作製し、サンプル作成以前と同じ熱履歴に統一した。

検証結果

このプロジェクトで使用した材料やプリンタ、造形パラメータおよび条件の種類は限定的であり、完全な包括的研究とは言えないが、以下のような重要な点が明確になった。

1. 造形の品質は、デスクトップ型プリンタより工業用のプリンタの方が安定していた。工業用は、高品質のモータ、アクチュエータ、計測システムと、温度が制御された密閉式チャンバーが搭載されていることがその要因であると予想された。
2. 造形パラメータおよび条件の影響は大きかった。同じプリンタと材料を使っても、作成したサンプルの性能は著しく異なった。
 - a. 4つのパラメータの中で樹脂の配向性の影響が最も大きかった。また、造形条件はほとんどの性能特性に影響を与えた。
 - b. エアギャップとノズルのサイズは相互作用性があった。隙間のサイズや密度に関係しているためだと推察された。
3. 形状は同じであっても3Dプリンティングと射出成形の試験サンプルでは、性能結果は一致しなかった。3Dプリンティング造形サンプルは、CTI以外、射出成形サンプルと比較して、絶縁強度・抵抗や難燃定格は低く、特に燃焼時間が長くなった。
4. 3Dプリンティング造形サンプルの表面はなめらかではないため、CTIを正しく評価できない場合があった。表面上の溝や隙間に電解液が毛細管作用により流れ込み、電極間の電解液が減り、CTI定格が高くなったと考察した。
5. UL 94燃焼試験の結果において、難燃性ABSでは、3Dプリンティング造形サンプルは射出成形サンプルより劣ったが、PEIの場合は同等または若干優れていた。これは、その材料固有の特性に加え、造形パラメータと造形要素が、3Dプリンティング造形サンプルの試験結果に影響していることを示唆しており、試験サンプルの物理的特性によるものと考えられる。

これらの知見は、他のプラスチックや他の3Dプリンティング造形方式にも展開できると考えられる。

実験計画

難燃性ABS：デスクトップ型プリンタ(4,000ドル)を使って造形

PEI：産業用プリンタ(45,000ドル)を使って造形

DoE

センター DoE 付完全階調

- ・ 造形方向
- ・ ラスター角度
- ・ エアギャップ
- ・ 層の厚さ

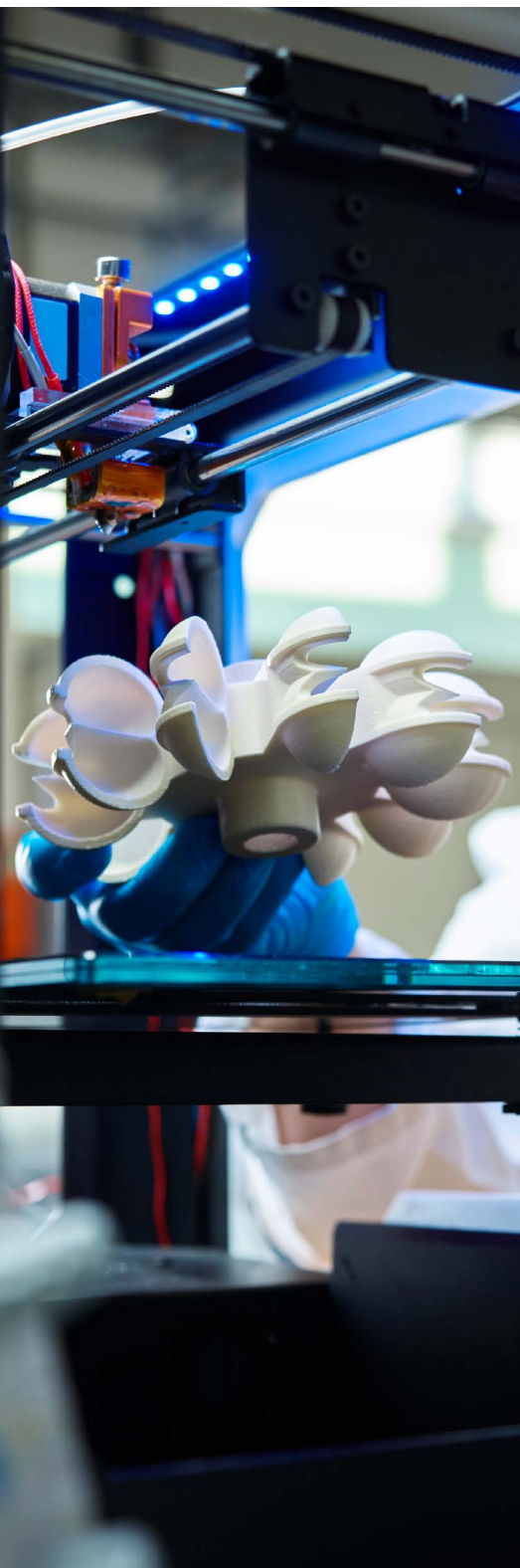
プラス射出成形

UL 746試験

- ・ 絶縁強度
- ・ 体積抵抗率
- ・ CTI
- ・ HAI
- ・ HWI
- ・ UL 94 燃焼性

調査が示していること：

- ・ 射出成形されたサンプルの寸法は、3Dプリンティングされたサンプルの寸法よりも一定していた
- ・ 工業用のプリンタは、デスクトップ型プリンタよりも品質は一定している
- ・ 造形パラメータおよび条件の影響は大きい
- ・ 同じプリンタで同材料を使って作成したサンプルの性能は条件によって著しく異なる
- ・ 3Dプリンティング造形サンプルは、比較トラッキング指数(CTI)を除いて、射出成形された試験サンプルより劣る
- ・ 3Dプリンティングされたサンプルについては、一部の試験方法と実施方法を検討する必要がある



最終製品における知見の適用

これらの結果を踏まえ、ULは次のことを提案いたします。

1. 3Dプリンタで造形された製品・コンポーネントの適合性評価は、同じ方法で作られた試験サンプルを使って材料特性の評価を行う。従来の成形方法で作製した試験サンプルを使用できない。
2. 3Dプリンタで造形された部品・コンポーネントに使用する材料のCTIは、「真の」値であるかを評価するガイドラインを業界内で策定する必要がある
3. 3Dプリンタで造形されたサンプルの材料特性と物理的特性が、性能特性に与える影響を評価する
4. 3Dプリンティング技術の影響評価を、UL 746B長期耐熱評価試験へと展開する
5. 3Dプリンティング技術の影響評価を、粉末床熔融結合、液槽光重合などのその他の3Dプリンティング方式にも展開する

新しい材料認証プログラム、新しいカードの誕生

製品開発者が樹脂材料の特質や性能特性を検証する際に活用しているのが、ULの認証プログラム(イエローカード)である。特に、イエローカードに記載されている電氣的 / 機械的 / 熱的特性、さらに燃焼性は、製品の機能 / 安全要求事項を満たす材料を選定する際の一助となっている。ULエンジニアもまた、認証を申請された製品に使われている材料の適性を評価する際、イエローカードに記載されている材料特性を確認する。

しかし、このイエローカードに公開されている材料特性は、射出成形、フィルム押出など従来の製造方法で作製された試験サンプルで評価した結果である。3Dプリンティングされた試験サンプルで評価されたものであることをイエローカードでは識別することはできない。前述したように、燃焼性や機械特性など、3Dプリンティングに使用された材料の安全上重要な性能特性は、その試験サンプルの製造方法が大きく影響する。その変化の度合いは、従来の射出成形法で作製されたものより影響は大きいと言える。技術進歩の代表である3Dプリンティング技術は、材料の評価 / 認証方法の変革も求めている。

3Dプリンティング用プラスチックに関する研究

前述の提案事項を踏まえ、ULは、3Dプリンティング用プラスチックの認証プログラム(ブルーカード)を開始した。これは、樹脂の認証プログラム(イエローカード)を補足するもので、3Dプリンティング用樹脂材料並びに3Dプリンティングによって造形されたコンポーネント・製品の認証に必要な追加要求事項が示されている。熱溶解積層法、粉末床熔融結合法、液槽光重合法、結合剤噴射法、材料噴射法などの全ての3Dプリンティング造形プロセスが対象である。

ブルーカードとは、認証された材料が指定された3Dプリント方式に適したものであるかを、シンプルかつ簡潔にまとめたデジタルカードで、3Dプリンティング用樹脂材料がULレコグナイズドコンポーネントマークを受けた際に発行される。ブルーカードの情報は、UL認証を受けた材料・コンポーネントを検索可能なUL Product iQ™とProspecter®に公開されるため、自社特有の安全/性能要求を満たした材料・コンポーネントを求める設計者、エンジニア、サプライヤーに即座にアピールすることができる。

影響力のあるマーケティングツール

ブルーカードは、認証を受けた材料が指定された3Dプリント方式に適したものであることを、コンパクトかつ簡潔にまとめたデジタルカードである。材料・コンポーネントの製造業者にとっては、製品を普及させるための理想的なツールとなりえる。また、製品の製造業者は、ブルーカードによって試験・認証を取得した材料を使用していることを世界に発信することができ、グローバル市場へ参入しやすくなる。自社製品が第三者の試験機関によって定期的に監査されていることで、見込み顧客にもそれをアピールでき、安心感を与えることができる。

競争の激しい市場における主な差別化要因

認証を取得した材料は、UL Product iQ™とProspecter®のデータベースに登録され、ブルーカードは、特定の安全性および性能要求事項を満たす材料・コンポーネントを探している多くの設計者、エンジニア、サプライヤーが即座に確認できる。また、UL認証には、ULフォローアップサービスも含まれており、認証を受けたプラスチックが安全性と性能に関してUL規格に継続して準拠していることを保証している。これは、他社との大きな差別化の要因となりえる。UL認証材料を使用して製造された製品は、UL認証材料を使用しない製品よりも迅速化かつ低コスト化が実現できる。



なぜ ULなのか？

ULのプラスチック研究の歴史は1941年にまでさかのぼり、現在では世界のすべてのトッププラスチック製造業者にサービスを提供している。ULは、プラスチック業界の関係者と密接に協力して、既存のUL規格の維持・強化、規格の制定、新たな技術や製品用途に対応した認証・試験プログラムの開発を行っている。

ULのプラスチックR&Dチームは、3Dプリンティング分野の専門家だけでなく、経験豊富なプラスチック試験エンジニアで構成されており、国際的に知られるプラスチックと火災の研究者がリーダーを務めている。ULの専門知識や評価、人材は、競争の激しい市場において、安全性や性能、品質を、OEM、購入者、規制当局に提供できる。これは、他社との重要な差別化要因である。

まとめと結論

ULのプラスチックR&Dチームは、3Dプリンティング用プラスチック材料の新しい認証プログラムが必要であることを認識した。そこで、様々な3D造形の影響を調査し、UL 94の燃焼性と746A材料特性に対するパラメータを構築するため、14か月にわたる調査研究を実施した。

研究の結果、3Dプリンティングは、造形パラメータとプリンタ機器によって、大幅に、さらには決定的に異なる材料性能をもたらす可能性があることが示された。これは、従来の製造で使用するために設計されたULのイエローカードプログラムが、驚異的な柔軟性を持つ3Dプリンティングには適していなかったことを意味する。当時、3Dプリンティング用材料や3Dプリンティングに特化した認証プログラムは、業界内に存在していなかった。

このニーズに対応するため、画期的な研究から得られた情報を基に、3Dプリンティングで使用される材料の認証プログラムを完成した。UL 3Dプリンティング用プラスチック認証プログラム(ブルーカード)このプログラムは、3Dプリンティング製品の材料の安全性、完全性、有用性を証明するために必要なデータを提示する。ULのブルーカードプログラムは、3Dプリンティング業界向けの重要な情報を第三者が認証プログラムである。

詳しくは[UL.com/BlueCard](https://www.ul.com/BlueCard)をご覧ください。

参考文献

1. <https://www.statista.com/topics/1969/additive-manufacturing-and-3d-printing/>
2. Ahn SH, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*.
3. Ahn SH, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*.

Es-Said OS, Foyos J, Noorani R, Mendelson M, Marloth R. Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. *Materials and Manufacturing Processes*. 2000; 15(1); 107-122.

Galantucci LM, Lavecchia F, Percoco G. Study of compression properties of topologically optimized FDM made structured parts. *Manufacturing Technology*. 2008; 57; 243-246.

Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modeling processed parts. *Materials and Design*. 2010; 31; 287-295

Bagsik A, Schoeppner V, Klemp E. FDM part quality manufactured with Ultem*9085. 14th *International Scientific Conference on Polymeric Materials*. September 15-17 2010; Halle (Saale).



UL.com

本書の情報は、発行時点で当社が有する最善の知識、情報、確信の範囲内で正確なものです。
本内容は一般的な情報を提供するもので、法的並びに専門的助言を与えることを意図したものではありません。
ULの名称、ULのロゴ、ULの認証マークはUL LLCの商標です © 2020