



応用ガイドブック

ジュエリー用3Dプリントパターンの の鋳造についての概要

ジュエリーの仕事の仕方が変わってきています。鋳造可能な感光性レジンがその変化を加速させています。独立系のデザイナーが独自のスタジオ内でコンセプトを考案したり、プロトタイプを製作したりできるようになってきました。鋳造所では生産能力が向上し、製作可能な品目が多様化するようになりました。デジタル製作技術がジュエリービジネスを成功させる鍵を握るようになってきました。本書では、Formlabsプリンタで3Dプリントした精細な宝飾品の鋳造方法について説明します。

目次

ダイレクトインベストメント鋳造とは？	3
1.鋳造用の設計	4
2.鋳造用パーツのプリントと準備	6
3.スプルーツリーを作る	7
4.鋳型を準備する	8
5.バーンアウトと鋳造	9
6.バーンアウトスケジュール	10
鋳造に関するトラブルシューティング	11

必需品

Formlabs製

- Form 3 (SLA) 3Dプリンタ
- Castable Wax 40 Resin
- Castable Wax Resin
- PreFormソフトウェア (無償)
- Finish KitまたはForm Wash

サードパーティ製

- Certus Prestige Optimaインベストメント
- 炉 (732°C、真空インベストメント装置、Neutec J2Rなどの鋳造システム)
- 屋内でバーンアウトを実施する時は、[Vent-A-Kiln](#)などによる強制換気

ダイレクトインベストメント鋳造とは？

ダイレクトインベストメント鋳造は、幅広い種類の金属で大小のパーツを製造する時によく用いられる金型製造法の一つで、ワックスを使用する場合には、ロストワックス鋳造とも呼ばれています。5,000年以上前に生まれた鋳造という技術は、金属部品を製造する最も容易な方法として知られ、製作者に幅広い種類の素材を使って製作する自由を与えています。

インベストメント鋳造では、手で彫るか、3Dプリントしたマスターパターンから空洞のある鋳型を製作します。マスターは、耐火性鋳造素材（または「インベストメント」）に浸し、それが乾いた後、固形化します。ワックスで作ったパターンまたは3Dプリントしたパターンは焼成工程で燃え尽き、パターンのデザインを逆にした陰型が残ります。その鋳型の空洞部分に溶融金属を流し込んで固めることで、金属部品が完成します。

ディテールの凝った複雑な形状のジュエリー用のワックスパターンを手作業で製作するのは、非常に高度な技術が必要です。需要やファッション・トレンドの移り変わりが激しいジュエリー業界ではもはや手作業中心の製法だけでは、市場の変化のスピードに追い付くのは年々難しくなっています。例えば、Formlabsが提供する先進的な素材やお手頃の価格で販売している3Dプリンタは、宝飾品の製造業者やデザイナーの働き方を大きく変貌させています。工業品質の製品をデスクトップで製作でき、これまで何時間も要していた複雑な形状の細かな調整作業なども、短時間で効率よく完了できるようになりました。



1. 鑄造用の設計

製作するパーツのデザインコンセプトからパターンの3Dプリントに至るまでのプロセスは、Rhino Gold、JewelCADまたは3DesignといったCADソフトウェアを使ったベストプラクティスを活用することをお勧めします。

参照製品:

Castable Wax 40 Resin:ワックス含有率の高いレジンで、穴開けや彫り込みといったさまざまな装飾にも対応できる優れた鑄造性が得られます。

Castable Wax Resin:ワックス含有率の低いレジンで、ワイヤフィリグリーなどの非常に精細な構造に対応できる生強度の高い特性を持っています。

インベストメント破損を防ぐ

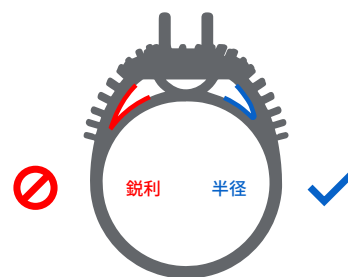
伝統的なワックスパターンも3Dプリントしたレジンパターンも、表面の滑らかな流れがデザイン的に重要である点など、多くの共通項があります。そのため、鋭利な角や縁を出来る限り作らないようにすべきです。縁が尖がっていると、熔融金属の乱流を増やすだけでなく、鑄型内に蓄積する膨張応力を高めることにも繋がります。

膨張応力が充満すると、レジンを直接鑄造する時の最も一般的な品質問題の一つである**インベストメント破損**が発生する可能性が高まります。インベストメント破損の兆候は、彫り込みや石の穴あけ箇所など、鑄造するパーツの陰側の特徴に見られるようになります。インベストメント破損は通常、粗い鑄造面またはインベストメントの破片から生じるピッチング(孔食)に伴って発生します。



鋭い縁に加えて、陰側の特徴の深さにも注意する必要があります。確かな経験則で言えることは、彫り込んだチャンネルや穴の幅を陰側の特徴の深さよりも大きくしておくことです。陰側の特徴が小さく、その特徴の周囲を埋めるインベストメントが脆弱な場合ほど、このガイドラインの重要性が増します。

Formlabsのエコシステムでは、Castable Wax 40 Resinが膨張やインベストメント破損を最小限に抑え、陰側の特徴が必要な箇所の信頼性を高められるように設計されています。



スプルー

繊細なスプルーチャンネルは3Dプリントで作ると、その部分を手作りするより遥かに作業時間が節約でき、ディテールの細部の鑄型充填率を高めることができます。フィードスプルーは直線にするか、先が細くなるように設計してください。

PreFormで追加できるサポート材は、スプルーとして使用しないようにしてください。スプルーを3Dプリントする予定でしたら、そのデータをお使いのCADソフトウェアで作成したデザインに取り込むことをお勧めします。

フィードスプルーを3Dプリントするのは、例えば、レジンパターンの届かない部分と別のレジンパターンの同様の部分を繋ぐ箇所にワックススプルーを置くのが難しい場合だけに止めておくべきです。その理由は、本物のワックススプルーの方が、鑄造するパーツの品質を高めやすく、スプルーが溶け始めた時に酸素がパターンに届きやすくなるからです。

スプルーの接続ポイント

レジンパターンは溶けないので、重みのあるパーツをワックススプルーに繋ぐ(そして繋ぎとめる)のが難しい場合があります。お使いのCADモデルにスプルーの接続ポイントを追加しておく、注いだフラスコに3Dプリントしたパターンが浮いてしまわないようにでき、フラストレーションを感じずに済みます。このポイントは、指輪の輪の部分の底に単に穴を開けたり、湯口棒と接続するためにワックスを充填またはその周辺に注げるようにする小さな空洞の柱を作ったりする形でも構いません。



大きく厚みがあるパーツ

Castable Wax 40 Resinは、重みのあるクラスリングなど、厚みがある宝飾品のプリントや鋳造に最適なレジンです。この素材を使えば、モデルのほとんどの部分で最大4mmまでの断面設計に対応することができます。モデルの厚みのある部分は、フィードスプルーに近ければ近いほど、鋳造がうまく行く確率が高まります。

厚みのある壁は最大10mmまでなら、ワックススプルーを十分設けておくと、酸素を必要な場所まで送り込むことができます。Castable Wax 40 Resinは、生強度が低いレジンですので、大きくて薄いシェルやサポート無しの長く細いスパンが含まれているデザインには不向きです。

Castable Wax Resinは、彫像など大きくて一枚岩のデザインに使用する代替素材として有効です。Castable Wax Resinの生強度は、Castable Wax 40 Resinよりも高いので、空洞のあるデザインや薄壁のシェルをプリントする時のレジンとして使用できます。製作目的に応じてCastable Wax ResinとCastable Wax 40 Resinを使い分けることによって、焼成工程でインベストメントに掛かる膨張応力を最低限に抑えることができます。内部が空洞のパーツからレジンを実際に流し出せるようにするためには、**3mmよりも厚いパーツはシェル化すべきで、ドレインホールは追加しておく必要があります。**

Formlabsでは、Castable Wax Resinでプリントする空洞のシェルの壁の厚みを0.7mmにすることを推奨しています。シェル化した大型のパーツの場合、内部に格子構造を追加しておく、取扱い強度が高まります。

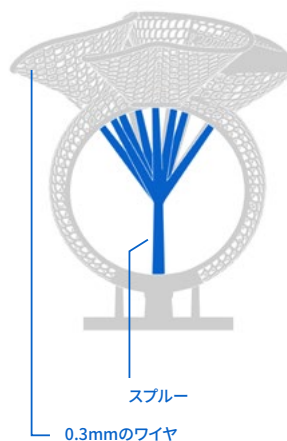
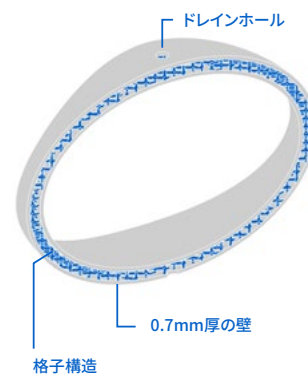
- Castable Wax Resinで空洞のある薄いシェル化したパターンをプリントする際、シェルの壁の最小厚み0.7mmの二倍近く(またはそれ未満)の部分がモデルにあるかどうかを確認してください。
- もしあれば、その部分はシェルをCADで作成する時に触れずに終わっている可能性があり、そのような部分が残っているパターンは鋳造には厚すぎます。厚みがあり過ぎるパーツは、焼成工程の間の膨張性亀裂を引き起こす可能性が高いです。

フィリグリー

Castable Wax Resinは、複雑なフィリグリーを含むピースの製作に求められる非常に高い精度を特性の一つとして備えています。精細なワイヤメッシュの鋳造を成功させるのは容易ではありませんが、スプルーを計画的にデザインに取り込めば可能です。

精細なメッシュは、ワイヤの直径が最小0.3mmまでならプリント可能です。プリントしたフィリグリーは脆弱で、サポートを取り外すと簡単に壊れてしまいます。フィリグリーはできるだけ自立できるように設計するべきです。

フィリグリーを設計する際、3Dプリントしたスプルーを鋳造後に取り外される「サポート」としての役割も果たせるように設計してください。細いチャネルで金属が凍結するのを避けるために、フィリグリーのメッシュの縁周辺の多くのポイントに溶融金属が流れるようにスプルーを追加してください。

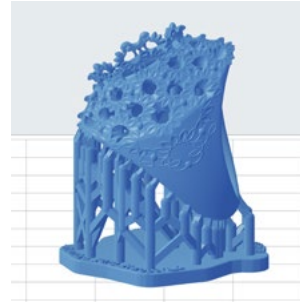


注記: Castable Wax 40 Resinは、生強度が低いレジンですので、ワイヤフィリグリーをプリントする素材としては不向きです。

2. 鑄造用パーツのプリントと準備

プリント

Form 3 デスクトップ3Dプリンタであれば、ジュエリーパターンを個別または複数まとめてプリントすることができます。Castable Wax 40 Resinを使ってプリントする宝飾品の品質を最も高める方法として、シングネットリングなどのトップ部分に重みのあるパーツを、垂直にではなく、角度を付けるように向きを調整して支えた状態でプリントすることをお勧めしています。軽量のジュエリーのデザインや Castable Wax Resinを使ってプリントするパーツは、垂直にしてプリントすることができます。



上部が重いパーツで最良の結果を得るには、向きに角度を付けるようにしてください。

洗浄

きれいに鑄造するためには、プリントしたパーツを純度90%以上のイソプロピルアルコール (IPA) で入念に洗浄してください。硬化していない余分なレジンが残っていると、インベストメントの硬化に干渉し、鑄造欠陥の原因になる恐れがあります。

パーツをIPA溶液槽から取り出したら、完全に乾くのを待ちます。二次硬化と鑄造に移る前に、圧縮空気を使って、パーツからIPAを完全に蒸発させてください。洗浄し、乾燥させた後もパーツに粘り気が残っている場合は、お使いのIPAを純度の高いIPAに入れ替える必要があるかもしれません。

CASTABLE WAX 40 RESIN

Form Wash	5分 + 純度の高いIPAで最終のすすぎ洗い
クリーニングキット	5分 + 5分 (二度目の洗浄は純度の高いIPAで)

CASTABLE WAX RESIN (V1)

Form Wash	5分 + 純度の高いIPAで最終のすすぎ洗い
クリーニングキット	10分 + 5分 (二度目の洗浄は純度の高いIPAで)

硬化

Castable Wax 40 Resinでプリントしたパーツの二次硬化は必ずしも必要ではありませんが、スプルー中にパーツが破損するようでしたら、取り扱い強度を高めるために二次硬化する選択肢もあります。プリントするパーツが脆弱であるなら、サポートを取り外し後に二次硬化することをお勧めします。未加工パーツの場合は、まだ柔軟性があるため、サポートを切り取った時に崩れる可能性は低いです。パーツの洗浄が不十分だと、二次硬化しても鑄造結果は良くなることはありません。

CASTABLE WAX 40 RESIN

Form Cure	不要 (オプション: 30分間の非加熱硬化)
UVライト	

CASTABLE WAX RESIN (V1)

Form Cure	不要
UVライト	

ヒント: パーツを二次硬化すると僅かに縮む (<1%) 可能性があります。

警告: Castable Wax 40 Resinでプリントしたパーツは室温以上の温度で二次硬化させないでください。温度が上がると、レジジンに含まれている固形のワックスが溶け、パーツ表面が粘り気が出てしまう原因になることがあります。



[ワックスヒートペン](#)を使えば、ワックススプルーツリーにレジジンパターンを繋げやすくなります。

3. スプルーツリーを作る

後処理したパーツを粘り気のあるスプルーワックスでメインのスプルーツリーに繋げます。プリントした各パターンとそれぞれのフィードスプルーの間の接点を滑らかにするために、ワックスを溶かします。

ワックスヒートペンを使えば、ワックススプルーツリーにレジジンパターンを繋げやすくなります。

ツリーの底には厚みのあるパーツ、ツリーの一番上には薄いパーツを置くようにします。3Dプリントしたパーツ間の間隔は、伝統的なワックスツリーよりも多少広げる必要がある場合があります。「薄くシエル化した」大型のパーツを鋳造する時は、ドレインホールをすべてワックスで埋め、インベストメント素材がプリントに進入することを防ぐようにしてください。

鋳造バリア

Formlabsでは、Castable Wax 40 Resinでプリントしたパターンを「鋳造バリア」フィルムに漬けることを推奨していません。鋳造バリアフィルムは、液体のワックスが加熱中に溶かすレジンの力を弱める可能性があります。

ヒント:プリントしたレジジンパターンは溶けません。プリントしたパターンをワックススプルーに繋げるのが難しい時は、強力瞬間接着剤または速硬化性エポキシを少量使用してみてください。また、別の方法として、モデルにスプルーの接続ポイントを足すと、繋ぎやすくなることもあります。

4. 鋳型を準備する

インベストメントフラスコ鋳型を準備する際の標準的な手順を下記に示します。真空インベストメント装置を使えば、インベストメントを均等に混合し、ガス抜きし、インベストメントを簡単且つきれいに注ぎ込むことができます。別の方法として、ミキサーと真空チェンバーを別々に使用することもできます。



1. スプリーのベースに鋳造用フラスコを付けます。穴の開いたフラスコを使用する場合は、インベストメントがその穴から漏れないように透明の梱包用ガムテープで全体を包んでください。



2. 製造元の指示内容に従って、インベストメントパウダーと冷たい蒸留水を混ぜます

ヒント: 鋳型の強度を高めるために、インベストメントパウダーに冷たい蒸留水を入れたら、混ぜる前にホウ酸(水の重量の1%)をインベストメント水に溶かします。



3. フラスコの横から、ゆっくりとパターンツリーを避けるようにしながらインベストメントを流し込みます。スムーズに流し込めば、水泡が内部に閉じ込められる確率が減ります。真空チェンバーを使えば、フラスコから流し込む際に発生する水泡を取り除くことができます。インベストメントが乾き、固まるのを待ちます。



4. ゴムのスプリーベースを慎重にフラスコから外し、振動のない環境で2-6時間放置します。インベストメントの製造元が推奨する安全対策に従ってください。Formlabsでは、防塵マスクまたは保護マスクをしながら作業することを推奨しています。

インベストメント素材のオプション

Formlabsでは、Castable Wax 40 ResinまたはCastable Wax Resinを使ってジュエリー用のインベストメント鋳造をする時のインベストメント素材としてはCertus Prestige Optimaを推奨しています。Castable Wax 40 Resinの方が、インベストメント素材として選択できるオプションは多いです。鋳造が難しそうな複雑なデザインの場合は、Nobilium Microfireなど、よりリン酸結合が強いインベストメント素材にアップグレードすることをご検討ください。代替のインベストメント素材をご使用される場合は、製造元が推奨するバーンアウト条件を鋳造計画に採り入れるようにしてください。

5. バーンアウトと鋳造

鋳造用フラスコを焼成用のオーブンの中に入れたら、推奨されているバーンアウトスケジュールに従ってオーブンを加熱してください。インベストメントの製造元の指示、フラスコの大きさや使用するプリント素材の量に応じて、バーンアウトスケジュールを調整してください。

Formlabsでは、チェンバーの隅々まで空気が十分流れ、蒸発するレジン蒸気の蒸気が安全に排気されるようにするために、換気の良い炉（吸気口と排気口が両方設けられているタイプ）を使用することをお勧めしています。

ショートバーンアウト

非常に短いバーンアウト（4-8時間）は、軽量の鋳造品やリン酸結合が強いインベストメント素材で鋳造する時だけに限られています。リン酸結合が強いインベストメント素材を使えば、Formlabsのどのレジンを鋳造しても、より早くバーンアウトすることができますようになります。

ヒント:

- 換気は絶対に必要ですが、空気の流れが良いと、オーブン内の温度も下がりやすくなります。お使いの装置に合ったバーンアウトスケジュールが定まってきたら、オーブンとフラスコの温度を監視しながら、鋳造プロセスを調整するようにしてください。
- 強制換気を使う場合は、オーブンの隅々まで空気が流れるように、できるだけ吸引力を高めるようにしてください。
- オーブンが数多くのフラスコで埋まってしまうと、空気の流れが悪くなります。その場合は、空気の流れを良くするためにオーブンに酸素発生器を装着するか、低流空気路を設けてください。

鋳造

鋳型を炉と鋳物から取り出します。Neutec J2R（米国）およびIndutherm MCシリーズ（EU）などの遠心鋳造機または真空鋳造機は、使用が簡単で、高度にコントロール可能です。

鋳造後は、鋳型を慎重に水で冷やし、余分なインベストメントを洗い流してください。

貴金属の互換性

Formlabsでは、Castable Wax 40 ResinとCastable Wax Resinでプリントしたパターンが金銀銅を使って鋳造可能であることを実証するための試験を実施しています。金属の互換性はインベストメントの特性を真っ先に見極めなくてはならない重要な要素です。使用する金属によって、インベストメントに対する温度耐性が異なります。

Formlabsがダイレクト鋳造用に開発したレジンはいずれも、完全に燃え尽きるために最低でも732°Cまで加熱する必要があります。特定のインベストメントに対するレジンの互換性を確かめたい場合は、インベストメントの製造元にご確認ください。



フラスコは換気の良い焼成用オーブンに入れるようにしてください。



細い箇所が設けられているディテールの凝ったデザインの場合、真空または遠心鋳造法を採用した方が鋳型を埋めやすくなります。



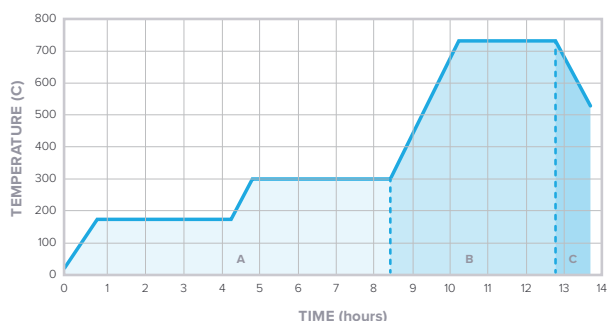
フラスコは、水に浸けて冷やしてから取り出すようにしてください。

6. バーンアウトスケジュール

Formlabsでは、ジュエリーのインベストメント鋳造用素材としてCastable Wax 40 ResinとCastable Wax Resinという二種類のレジンを開発しています。Castable Wax 40 Resinは、さまざまなバーンアウトスケジュールにより柔軟に対応できるように設計されていますので、レジンを使って鋳造するのが初めてのユーザーでも失敗する可能性はそれほど高くありません。Castable Wax Resinをお使いの場合は、バーンアウト条件を定めたガイドラインにより厳格に従う必要があり、品質の高い鋳造結果が得られるパターンの形状にも制約があります。

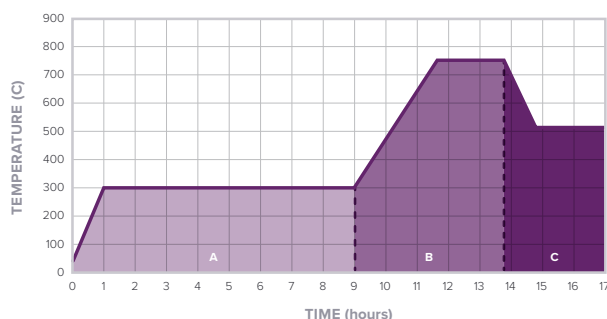
Certus Prestige Optimaまたは同等のインベストメント素材を使用した時の各素材の推奨バーンアウトスケジュールは、下記のとおりです。

Castable Wax 40 Resin



	フェーズ	所要時間	スケジュール °C
	加熱フラスコ乾燥	180分	55°C
A	ランプ	48分	2°C/分
	ホールド	180分	150°C
	ランプ	75分	2.0°C/分
	ホールド	180分	300°C
B	ランプ	108分	4.0°C/分
	ホールド	180分	732°C
C	ランプ	44分	-5°C/分
	鋳造ウィンドウ	最長で2時間	望ましい鋳造温度

Castable Wax Resin



	フェーズ	所要時間	スケジュール °C
	フラスコの挿入	0分	21°C
A	ランプ	60分	4.7°C/分
	ホールド	480分	300°C
B	ランプ	100分	4.5°C/分
	ホールド	180分	750°C
C	ランプ	60分	-4.0°C/分
	鋳造ウィンドウ	最長で2時間	望ましい鋳造温度

鑄造に関するトラブルシューティング

問題	原因	解決策
穴または彫り込み部が埋まってしまった場合や孔食面が近くにある場合	レジン熱膨張によって高まった応力によって局所的なインベストメント破損が発生。	ランプのバーンアウト速度が遅い。
		CADのモデルの鋭利な角にフィレットを追加してみてください。
		CADの彫り込み部を浅くしてください。 みて
		(Castable Wax Resinをお使いの時は) Castable Wax 40 Resinにアップグレードしてみてください。
金属のフラッシング	インベストメントの強度が足りないため、レジンの大部分の熱膨張により亀裂が発生。	ランプのバーンアウト速度が遅い。
		レジンパターン間の間隔を広げてみてください。
		インベストメントに加える水の比率を下げてみてください。
		インベストメント鑄造後に放置する設定時間を延ばしてみてください。
粗い表面 (目に見えるインベストメント破損は無い状態)	液体ワックスを取り除く前に加熱し過ぎでレジンが沸騰している。	ランプのバーンアウト速度が遅い。低温でホールドする時間を延ばしてみてください。
	燃焼に必要な酸素の量が足りない。	焼成オープンに流れ込む空気量を増やしてみてください。
		問題箇所にワックススプルーを足して、メインのフィードスプルーに繋げるようにしてください。
	レジン横断面に厚みがあり過ぎるため、燃焼中に鑄型の壁にパーツが拘束されている。	鑄造前に、軽い真空圧でフラスコを取り出してください。
鑄造中に発生する小さな気泡	インベストメントに粘り気があります。	Castable Wax 40 Resin: • 上記参照 Castable Wax Resin v1: • 壁の厚さが<2mmであれば、上記のステップをお試しください。 • 壁の厚さが>10mmであれば、パーツを薄くシェル化して空洞部分を作ってください。 • 壁の厚さが2mmから10mmの間であれば、レジンをCastable Wax 40 Resinに切り替えることをご検討ください。
	フラスコからガスを完全に抜くにはインベストメントの作業時間が短すぎます。	インベストメントに加える水の比率を下げてみてください。 インベストメントに混ぜる水を冷水にしてみてください。



パピリオリング
LACE ジェニー・ウー作

デジタルジュエリー製作についてより詳しく説明

鋳造には特殊技能を要します。最良の結果を得るためには、鋳造の専門家の協力を得るようにしてください。

Formlabsは、Lars Sögaard Nielsen氏ならびにKEA (コペンハーゲン造形技術大学) の研究チームが、同チームの鋳造プロセスの文書化を許可いただいたことに、深く感謝いたします。

関連リソース

[3Dプリントするジュエリーのデザイン](#)

光造形 (SLA) 方式のデスクトップ3Dプリントをジュエリー業界で活用する方法について、多くの具体例を使ってプリントや鋳造を成功させるヒントやコツを交えながら概説します。

[3Dプリントしたマスター用の加硫ゴム成形](#)

室温や中温の加硫工程で使用する鋳型マスターを3Dプリントして複数のワックス品目をForm 2で製作する方法について説明します。

[3Dプリントで製作した特注ジュエリーの販売](#)

Form 2は操作しやすく、ショールームや小売店に設置する実演用の3Dプリンタとして適しています。3Dプリントした模型を使えば、特注品を注文されたお客様の要望により早く、的確に応えることができ、満足度の向上に繋がります。