

光造形模型の精密鑄造試作部品への適用

Application of Stereo Laserlithography Apparatus to Investment Casting Trial Parts

梶 浦 幸 生*
Sachio KAJIURA

吉 野 貞 文*
Sadafumi YOSHINO

要 旨

試作には“コスト削減”、“リードタイム短縮”、“設計変更への迅速な対応”といった項目が要求されている。これらの要求に対応するため、ガスタービンエンジン用精密鑄造部品の試作に、光造形模型をマスターパターンとして適用した。従来のロストワックス法とは異なり、模型燃焼後の炭化樹脂の鑄型表面への固着や、模型表面の積層跡といった光造形模型適用時特有の問題点が顕在化した。炭化樹脂に関しては燃焼方式の最適化を図り、積層跡については模型の仕上げ方法を改善し解決した。その結果、精密鑄造の試作部品として寸法形状要求を満足する製品を製作することができた。同時に従来の試作方法と比較してマスターパターンの製作コストを約 1/15 に、リードタイムを約 1/8 に低減できた。

ABSTRACT

Concerning investment casting, “decreasing cost”, “reducing lead time” and “responding to design-revision, quickly” has been often required in the early stages of a project. So, Stereo Laserlithography Apparatus (SLA), a typical one of Rapid Prototyping techniques, has been applied to a master pattern of investment casting trial parts for our gas turbine engine. In such a new application, problems peculiar to SLA have been yielded, for example, “coherence of carbide to ceramic mold” and “layer mark of SLA”. The coherence has been dissipated by optimization of burning condition and the layer mark has disappeared with an improved surface finishing method. As a result, trial parts satisfied with design requirements could be produced. Also, the cost and the lead time have become to 1/15 and 1/8, respectively, as compared with traditional method.

1. まえがき

従来、ガスタービンエンジンなどで用いられる精密鑄造試作部品は、一般的なロストワックス鑄造法で製作されてきた。この製法は、ワックス用金型を製作し、それを用いてワックスを射出成形してマスターパターンをつくり、鑄型を造型して鑄造するという方法である。しかしこの方法は、あくまでも量産を前提とした方法であり、金型を製作するためのコスト・時間を必要とする。また一度金型を製作してしまうと、設計変更に対応することは困難である。

同時に試作には“コスト削減”、“リードタイム短縮”、“設計変更への臨機応変な対応”といった項目が要求されている。これら三つの項目に対応するため、最近では、金型を製作せずに、ワックスの固まりから機械加工でワックス模型を削り出す、いわゆるマシナブルワックスを利用した試作方法や、紫外線硬化樹脂をレーザーで硬化させた光造形模型でマスターパターンを造型して試作を行う方法等が試みられ

るようになってきた⁽¹⁾。

マシナブルワックスを用いた方法では金型の製作はしないが、削り出しプログラムの作成に時間が掛かる。また薄肉部の加工ではワックスの逃げに対する対策等が必要であり、形状によっては製作が非常に困難なものがある。しかし一旦模型が出来れば、従来のワックス模型と同じ工程で鑄造品を作ることができる。

光造形模型の場合、形状の複雑さにかかわらず、三次元 CAD データで表された模型は造形可能である。しかし積層段差の処理の問題や、モデル造形後の工程がワックス模型とは異なる点等、解決すべき問題点が多い^{(2)~(4)}。

我々はこれまで、金型からワックス成型品を得る方法、及びマシナブルワックスを用いる方法で鑄造を試みてきた。更に上記した試作に要求される三つの項目に対応するために、光造形模型をマスターパターンとして適用し、ガスタービンエンジンの機能部品の試作を行ったので、その工程と発生した問題点・解決策について報告する。

*和光基礎技術研究センター

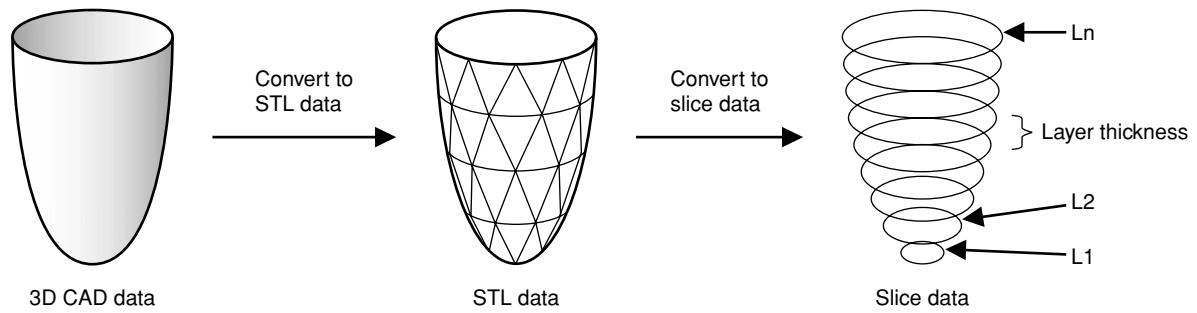


Fig. 1 Data converting process

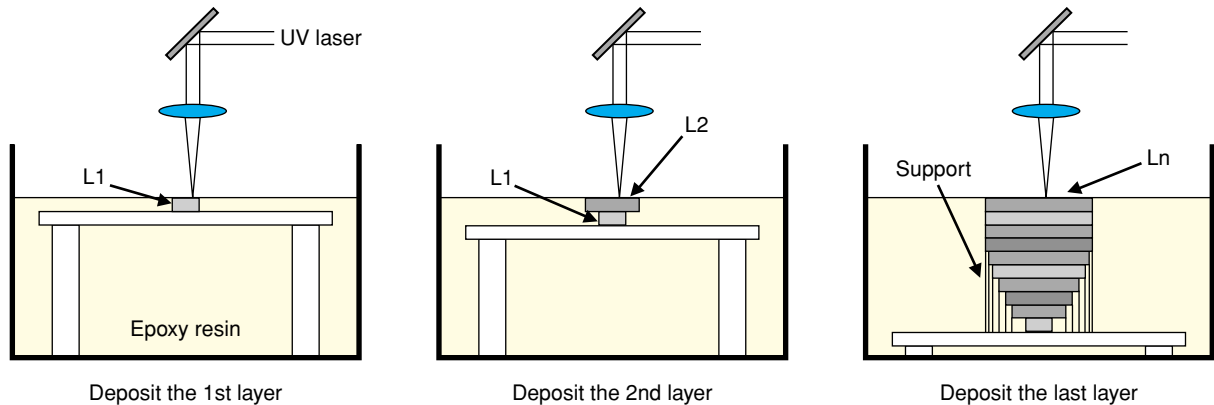


Fig. 2 Deposition of SLA model

2. 光造形模型の造形方法

近年、三次元 CAD データから直接三次元立体模型を造形するラピッドプロトタイピング技術が急速に発展している⁽⁵⁾。光造形は、このようなラピッドプロトタイピング技術のうちのひとつであり、光硬化性樹脂に紫外線レーザを照射し、樹脂を硬化させて模型を製作する方法である。Fig. 1, 2 に光造形模型の造形方法の概略を示す。

まず三次元 CAD データを STL (Stereolithography) フォーマットに変換し、更に任意の積層ピッチで輪切りにしたスライスデータに変換する。次に光硬化性樹脂の槽の中にテーブルを置き、積層ピッチの厚み分テーブルを液状樹脂の中に沈め、紫外線レーザを輪切りにしたスライスデータに沿って照射し、第一層(L1)を造形する。第一層造形後、更にテーブルを積層ピッチ分沈めて第二層(L2)を造形する。これを最後の層(Ln)まで繰り返し、スライスした層を積層することにより立体模型を造形する。模型のオーバーハング部分には、テーブルからサポートが同時に造形され、この部分は造形完成后、除去される。

光造形模型には、ソリッドモデルと中空モデルの二種類がある。ソリッドモデルは模型内部まで全て樹脂を硬化させたもので、主に意匠確認や風洞実験用模型等に利用される。中空モデルは最外殻を 0.4 ~ 1 mm 程度の薄いスキンで造形し、内部をハニカム構造に造形したものである。ソリッドモデルを精密鑄造用マスタパターンに使用すると、

模型焼失時に樹脂の熱膨張で鑄型割れが発生する。そのため通常精密鑄造用には中空モデルが使用される。Fig. 3に中空モデルを示す。



Fig. 3 Hollow model (SLA)

3. タービンノズルの試作

Fig. 4 は光造形模型をマスタパターンに適用して製作した、ガスタービンエンジンのタービンノズルである。その精密鑄造の工程を以下に述べる。

3.1. コンポーネント工程

Fig. 5 はタービンノズルの光造形模型である。従来は全てワックスで造形していた。また製品部のみを光造形模型とし、湯口や湯道・堰といった溶融金属を製品部へ廻すためのいわゆる方案部はワックスとする方法もある。我々は方案部の造型/組立工数を低減するため、方案部も全て光造

形模型にて造形した。模型の積層ピッチは0.1mmとしたため、造形後の模型曲面は、0.1mm ピッチの階段状となっている。これをサンドペーパー等で研磨して仕上げる。後述するが、この仕上げが不十分な場合、鑄物表面に積層跡がそのまま転写され、欠陥となる。

仕上がった模型に湯口カップを取り付け、鑄型造型用のシャフトを組み付けて、Fig. 6に示すマスタパターンのコンポーネントとする。

3.2. 鑄型造型

次にマスタパターンの周りにセラミック鑄型を造型する。コンポーネントを液状のセラミックスラリーの中に浸漬して模型表面を濡らし、表面が乾く前に砂(耐火材)をまぶしてコーティングし、乾燥させる。3～4時間の乾燥時間を挟んで、この工程を10回程度繰り返す。初層でコーティング

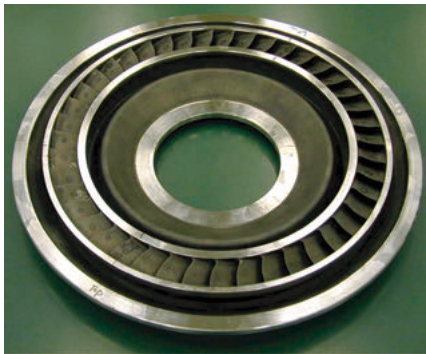


Fig. 4 Turbine nozzle

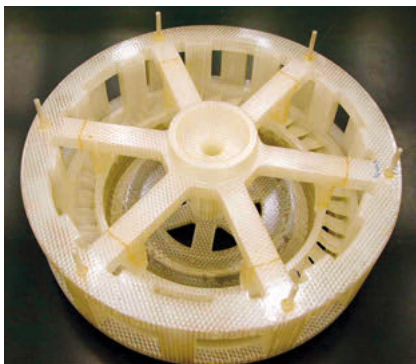


Fig. 5 SLA of turbine nozzle

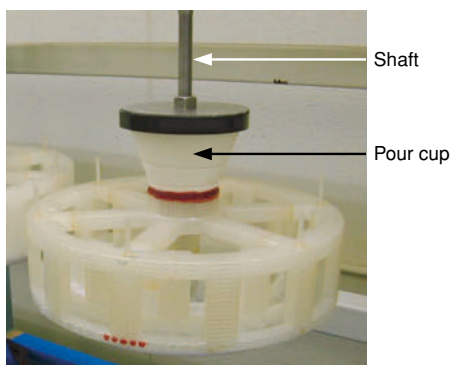


Fig. 6 Component of turbine nozzle

する耐火材は、マスタパターンの表面状態を鑄肌に忠実に転写させるために、微細な粒度のものを使用する。中間層～バックアップでは、鑄型強度を上げるために、徐々に粒度の大きな耐火材をコーティングする。最終的には鑄型厚みが8～10mm 程度の生の鑄型となる。

3.3. モデル焼失／鑄型焼結

上記のように造型した生の鑄型の中には、まだ光造形模型が入っている。次工程ではこの鑄型を焼成炉に入れ、段階的に樹脂の発火点(約 400℃)以上に炉内を昇温し、光造形模型を燃焼・消失させる。そのまま更に約 1000℃まで昇温し、その温度で数時間保持して鑄型を焼結する。Fig. 7が出来上がった鑄型である。

樹脂の燃焼が不十分だと、鑄型内に炭化した樹脂が焼け残り、鑄型内部表面に固着する。この炭化物形状がそのまま鑄物表面に転写されると“柚子肌”という表面欠陥となる。具体的な柚子肌欠陥対策については後述する。

3.4. 鑄造

鑄造に使用した材料は Ni 系耐熱合金である。このような耐熱合金の鑄造では、材料の機械的特性を得るため、及び複雑形状部への湯廻り不良を低減するために、真空溶解炉が使用される。鑄型は溶解炉の中で約 1000℃まで昇温され、この温度で1時間程保持された状態で、約1500℃の溶湯を鑄込まれる。Fig. 8は注湯後冷却して、鑄型ばらし・砂おとしを行った状態である。



Fig. 7 Ceramic shell mold of turbine nozzle



Fig. 8 As cast of turbine nozzle with gating system

3.5. 方案切断，機械加工

得られた鋳物は，方案部を除去し，溶体化・時効処理を施した後，機械加工される．寸法検査の結果，JISの定める精密鋳造品の寸法公差を満足していた．

4．問題点と解決策

4.1. 柚子肌

光造形模型消失時に焼け残った(炭化した)樹脂が鋳型表面に固着し，それがそのまま鋳物表面に転写されたものを“柚子肌”という．Fig. 9に鋳型面に固着した炭化物を，Fig. 10に鋳肌面に発生した柚子肌を示す．

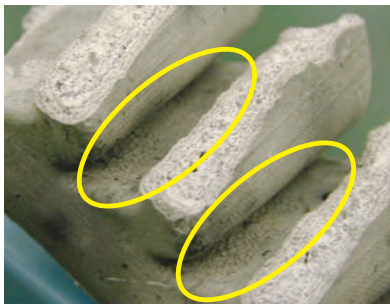


Fig. 9 Coherence of carbide (Mold)



Fig. 10 Orange peel (Cast)

柚子肌は，鋳物表面近傍に無数のヘアクラックが発生しており，機械強度が著しく低下する．また鋳造部品の非破壊検査のひとつである蛍光浸透探傷試験を行うと，全面に渡って欠陥指示となる．

これを解決するために，Fig. 11に示す扇形状の試験片を光造形模型で作製し，鋳型を造型したのち，次の三通りの方法で燃焼試験を行った(Fig. 11は二層目まで鋳型造型してある)．



Fig. 11 Test piece

(1)従来方法：鋳型をそのまま焼成炉内に置く．

(2)エア吹込：鋳型開口部から鋳型内部にエアを吹き込む．

(3)エア吹込とエア抜き：鋳型開口部からエアを吹き込み，逆側に切り込みを入れてエアを抜く．

焼成炉の昇温条件は三通りの方法とも同じとした．

その結果，従来方法では鋳型内部に炭化物が固着していた(Fig. 12)．エア吹込を行う場合でも，エア抜きがない方法では鋳型内部で空気の流れがないために，部分的に炭化物の固着がみられた(Fig. 13)．エア抜きをつけてエア吹込を行った場合では，炭化物は全く発生していなかった(Fig. 14)．

タービンノズルの試作では，模型焼失時に鋳型内部にステンレス製の管を入れてエアを供給した．同時に鋳型外周部のエア抜き穴からエアを排出することによって樹脂を完全燃焼させ，柚子肌の発生を抑えることができた．

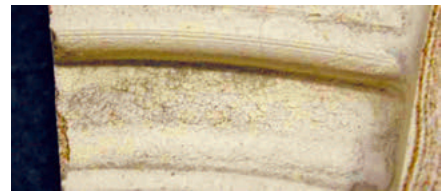


Fig. 12 Coherence of carbide (Usual burning condition)



Fig. 13 Coherence of carbide (Air blowing)



Fig. 14 No coherence (Air blowing and air vent)

4.2. 積層跡，サポート跡

光造形模型は積層模型であるため，曲面は階段状に積層される．通常 Fig. 15に示すように，モデルデータの外側にスライスデータをオフセット設定し，階段の凹部がマスターパターン形状になるようにする．そのため積層後，その段差を研磨して所定の形状に仕上げる必要がある．また形状によってはサポートが造形されており，積層後サポートを除去し，研磨して仕上げなければならない．

しかし Fig. 16, 17に示すように光造形模型は半透明であるため，目視により表面の仕上がり状態を正確に把握することは困難である．

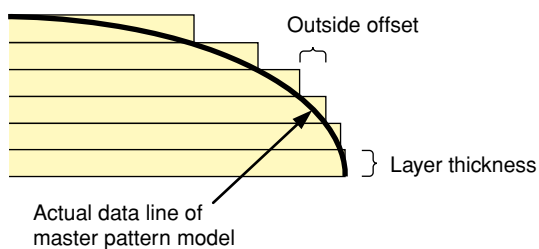


Fig. 15 Offset of slice data



Fig. 16 Layer mark (SLA)



Fig. 17 Remains of support (SLA)

この状態で仕上げただけでは、鑄造後、Fig. 18に示す積層跡やサポート跡、Fig. 19に示す除去したサポート屑の付着等が目視で認識され、模型の仕上がり状態が不十分であったことが明らかになった。

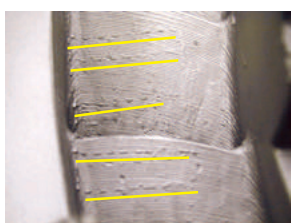


Fig. 18 Layer mark and remains of support (Cast)

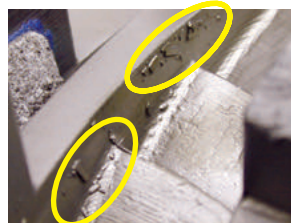


Fig. 19 Adhesion of removed support (Cast)

これに対しては模型の仕上げを丁寧にする必要があるが、上記したように、半透明のままで表面状態を把握することは難しい。対策として模型表面にプライマを塗布して、表面状態を目視で確認できるようにした。Fig. 20, 21はFig. 16, 17と同じ仕上がり状態の模型にプライマを塗布したものである。色合いが鑄物に近くなり、表面の仕上がり状態を確認することができた。



Fig. 20 Primer coated surface of SLA (Layer mark)



Fig. 21 Primer coated surface of SLA (Remains of support)

プライマを塗布して仕上げた模型をFig. 22に示す。Fig. 16のプライマを塗布せずに仕上げた状態では面粗度 $R_z = 70 \sim 100$ であった。一方Fig. 22のプライマを塗布して仕上げた状態では $R_z = 10 \sim 15$ と改善された。



Fig. 22 Finished surface of SLA (Primer coated)

4.3. 積層面波打ち

光造形模型は、前述したように三次元CADデータをSTLフォーマットに変換して、積層厚みのスライスデータにし、それを元に模型を造形する。そのためスライスデータの形状でレーザの走査形状が決まり、模型形状となる。STLフォーマットでは、Fig. 23に示すように三角形のパッチで面を現す。レーザはその三角形の辺を走査するために、滑らかな曲線とならず、Fig. 24のように曲面に波打ちが発生する。Fig. 25は鑄造面、Fig. 26はデータ上の図である。このままの状態では模型の積層段差を研磨して仕上げて、うねりはそのまま残り、また表層のスキン厚さが不均一になる。

これについては、STLデータに“Z Smoothing”という処理を行うことにより、Fig. 27, 28に示すようにスライスデータを滑らかな曲線にできるようになった。この処理を施したデータで模型を造形したところ、波打ちは発生していなかった。

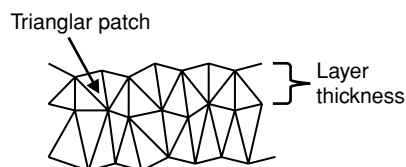


Fig. 23 Image of STL data model

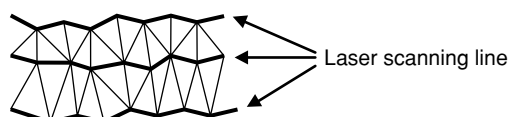


Fig. 24 Image of laser scanning line

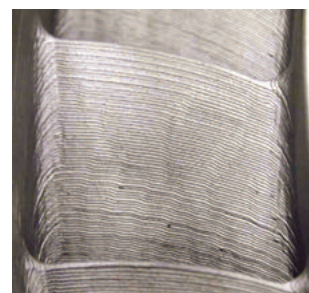


Fig. 25 Wavy lines on blade surface (Cast)

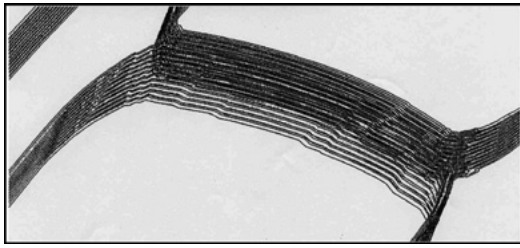


Fig. 26 Laser scanning line on data without Z smoothing

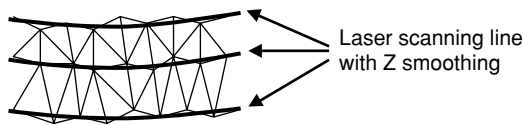


Fig. 27 Image of laser scanning line with Z smoothing

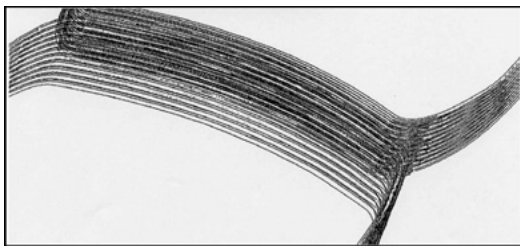


Fig. 28 Laser scanning line on data with Z smoothing

5. コスト、リードタイム等の比較

今回試作したタービンノズルを例にとって、従来のワックス金型を製作する方法、マシナブルワックスでワックス模型を削り出す方法、そして光造形模型を使用する方法の三つについて、コスト、リードタイム及び設計変更への対応の容易さを比較し Table 1 に示す。コストは模型を一個製作するための費用を、金型を用いた場合を100%として比較した。リードタイムは三次元CADデータからマスタパターンが出来上がるまでの時間である。

光造形模型を利用した場合、従来の方法と比較し、コストを約 1/15 に、リードタイムを約 1/8 に低減できた。また、設計変更に対しても、従来より容易に対応することが可能となった。

Table 1 Comparison of cost, lead time, etc

	Metal mold	Machinable wax	SLA
Cost (%)	100	13	7
Lead time (month)	4.0	1.5	0.5
Response to design revision	Difficult	Difficult	Easy

6. まとめ

光造形模型をマスタパターンに適用し、タービンノズルの試作を行った。従来のロストワックス法とは異なり、光造形模型消失時に焼け残った炭化樹脂の鑄型表面への固着や、光造形模型表面の積層跡といった特有の問題点が顕在化した。焼け残りに関しては、模型消失時に鑄型内部にエアを供給し、同時に鑄型外周部のエア抜き穴からエアを排出することによって樹脂を完全燃焼させて解決した。また積層跡については、模型表面にプライマを塗布して仕上げることでより面粗度を向上させて解決した。

その結果、JISの定める精密鑄造品の寸法公差を満足したタービンノズルの試作部品を製作することができた。同時に従来の試作方法と比較して、マスタパターンの製作コストを約 1/15 に、リードタイムを約 1/8 に低減できた。

今後は製品部・方案部ともタービンノズルと異なる形状の部品について、光造形模型の適用を進めていきたい。

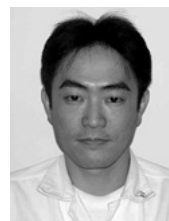
謝 辞

光造形模型の製作にあたり、ご協力をいただいた株式会社インクスの方々に感謝いたします。

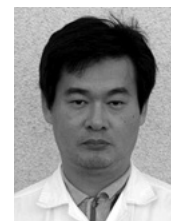
参考文献

- (1) 今村 正人: RP 模型の精密鑄造への応用, JACT NEWS 1998.6.20, p.27-36 (1998)
- (2) 荒砥 孝二ほか: 光造形法による精密鑄造製品の開発, 宮城県工業技術センター研究報告No.27, p.49-51 (1996)
- (3) 荒砥 孝二ほか: 光造形法による精密鑄造製品の開発, 宮城県工業技術センター研究報告No.28, p.62-64 (1997)
- (4) 荒砥 孝二ほか: 光造形法による精密鑄造製品の開発, 宮城県工業技術センター研究報告No.29, p.34-38 (1998)
- (5) 梶原 弘之: ラビッドプロトタイピング技術の現状, 精密工学会誌 Vol.67, No.3, p.403-406 (2001)

■ 著 者 ■



梶浦 幸生



吉野 貞文