

3D プリンターを用いた精密铸造用セラミックコアの開発

宮嶋圭太*・川原彰広**・渡辺裕和**・本堂 剛**・加藤真示*.*.*.*

* 株式会社ノリタケカンパニーリミテド セラミック・マテリアル事業本部 セラミックス事業部

** 株式会社ノリタケカンパニーリミテド 開発・技術本部 研究開発センター
〒 451-8501 愛知県名古屋市西区則武新町三丁目1番36号

*** 名古屋工業大学 先進セラミックス研究センター
〒 507-0071 岐阜県多治見市旭ヶ丘 10-6-29

Development of Ceramic Core Molds for Precision Castings Using 3D Printer

Keita Miyajima*, Akihiro Kawahara**, Hirokazu Watanabe**, Tsuyoshi Honda**, Shinji Kato*.*.*.*

*Ceramics Division, Ceramics & Materials Group, Noritake Co., Limited

**Reserch & Development Center, Development & Engineering Group
3-1-36 Noritake-Shinmachi, Nishi-ku, Nagoya, Aichi 451-8501, JAPAN

***Advanced Ceramics Research Center, Nagoya Institute of Technology
10-6-29 Asahigaoka, Tajimi, Gifu 507-0071, JAPAN

This paper introduces the overview of the development of ceramic core molds for precision castings using powder layered manufacturing (3D printer) which can make any complex configuration easily.

Keywords: Carbon neutral, Gas turbine, Ceramic core mold, powder layered manufacturing, 3D printer

1. はじめに

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) の第5次報告書^[1]では、これから有効な温暖化対策をとらなかった場合、21世紀末(2081年~2100年)の世界の平均気温は20世紀末頃(1986年~2005年)に比べて2.6~4.8℃上昇すると報告されている。地球温暖化に対する危機感が高まりから、わが国では菅首相(当時)が2050年のカーボンニュートラルを表明し、2020年10月に第6次エネルギー基本計画が策定された。

図1に、2019年、2030年の電源構成を示す^[2]。火力発電に関しては2050年に向けて漸減していくが、エネルギーの安定供給の観点から急速に無くなる方向にはない。更に基本計画には、「次世代化・高効率化を推進しつつ、非効率な火力のフェードアウトに着実に取り組む」とあり、石炭、石油を用いた火力発電から、高効率なLNGを用いた火力発電にシフトしていくことが想定される。

さて、高効率火力発電に用いられるガスタービンは高温下で動作させるほど熱効率は向上する。そのため、1980年代には1,100℃程度であった燃焼温度が近年では1,600℃を超えるに至った。ガスタービンには多数のタービンブレード翼(以下、ブレード翼)が配置されているが、高温高圧下でブレード翼が耐えられるよう耐熱

合金とサーマルバリアコーティングの開発および冷却構造設計が進められてきた。なかでも高温高圧下に曝される翼の内部には複雑で細かな冷却流路が作られている。株式会社ノリタケカンパニーリミテドでは、この冷却流路を形成するための精密铸造用セラミックコア(以下、セラミックコア)を製造販売している。図2にセラミックコアの例を示す。一般にセラミックコアは、シリカ・ジルコン系あるいはシリカ・アルミナ系の多孔質セラミックスから成り、流込み成形もしくは射出成形で作られる。ブレード翼にはNi系耐熱合金等が使用され、内部の冷却流路はロストワックス法(図3)により形成される^[3]。铸造の際にセラミックコアは高温の溶融金属と接触し、その後は金属とともに冷却されることから、

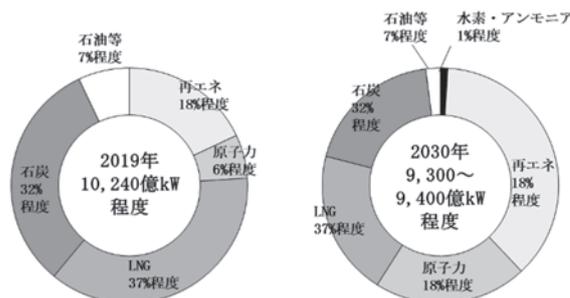


図1. 日本の電源構成

熱変形や熱衝撃破壊を生じない機械的特性が必要となる。さらに、鋳造終了後には溶出除去されることから、アルカリ性水溶液に対して容易に溶解することが求められる。そして、ガスタービンの高効率化の流れのなかで、冷却流路は複雑化と精細化が進み、それに応じて形状への要求が年々厳しくなっている。

一方で、2013年にオバマ大統領が一般教書演説で取り上げたように3Dプリンターが注目され、セラミック



図2. セラミックコアの例

ス部品においても様々な手法の3D造形技術が開発されてきた^[47]。我々はこの造形技術がセラミックコアの製造プロセスに適用できると考え、検討を重ねてきた。

2. セラミックコアにおける3D造形のメリット

セラミックコアの代表的な成形方法として、射出成形が挙げられる^[8]。図4のように、射出成形では初めに金型を作製するため、その作製に1~2か月を要し、試作品が完成するまで合計で最低でも3か月は必要となる。一方で3Dプリンターを使用すれば、金型を作製せずに1~2週間という短い期間で造形体を作製することができる。また、データを変更するだけで簡単に形状を変化させられることから、設計段階の試作トライに大いに活用できる。

3. 粉末積層造形法によるセラミックコアの造形

タービン翼に使用される耐熱合金は組成等が厳密に管理されており、鋳造の際にセラミックコアから微量な成分が混入し、表面の結晶相などを変化させてはならない。そのため、造形用材料には、弊社が開発したセラミック

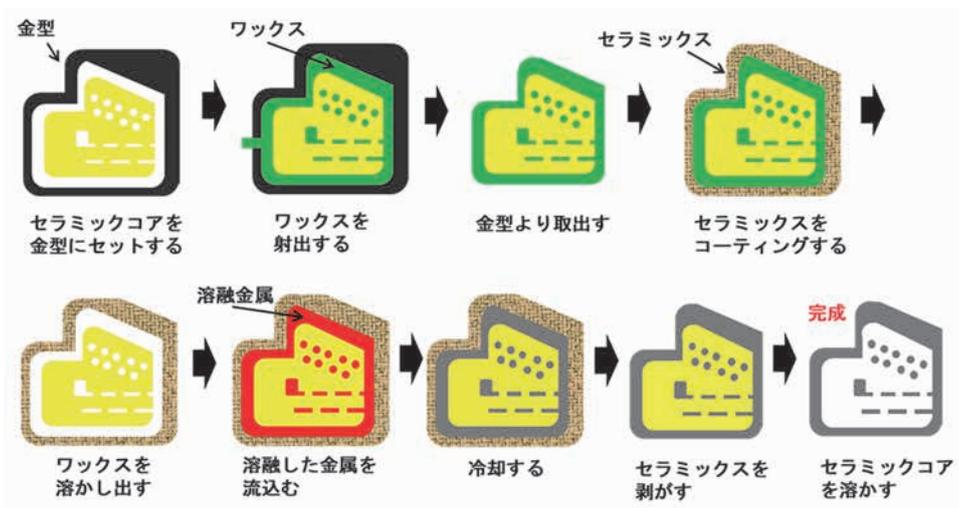


図3. ロストワックス法の概要

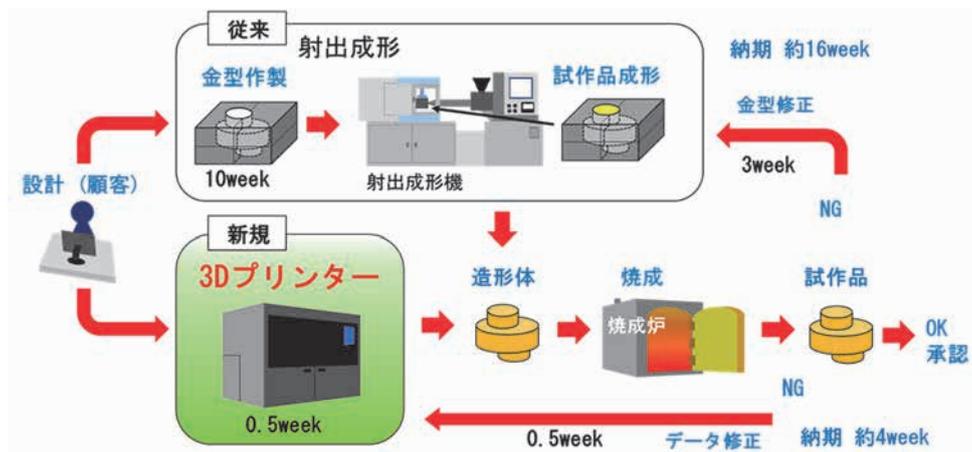


図4. 3Dプリンターを活用したセラミックコアの新規開発手法

コア用のセラミックス粉末を使用した。この材料を用いれば、アルカリ性水溶液への溶解性も良く、 casting 工程を変更することなく適用できる。

はじめに、シリカとジルコンを主成分とするセラミックス粉末と水溶性樹脂を混合し、図5に示す混合粉を作製した。混合粉の平均粒子径は約 20 μm である。3D 造形は、混合粉を平滑に 1mm 以下の厚さで馴染し広げた層にプリンタヘッドから水系インクを噴霧して造形部分を硬化させる「粉末積層法」を用いた。粉末積層法では、粉末を造形ステージへ層毎に均一に敷き詰めること（リコート性）がキーとなる。図6は、混合粉を積層厚さ 0.1mm で敷き詰めた様子である。リコート性の向上のためには粉体の流動性を適切に制御する必要がある。流動性が悪い場合、リコート面に筋の様なへこみが発生し欠陥なく積層することができない。一方、粉体の流動性が良すぎる場合、リコートの際に粉が動いてしまうことで欠陥が生じる。本開発においては粉体の流動性を制御したことで、図6の様な欠陥のないリコート面を得ることができた。

次に、セラミックコアの基本的な要求特性である機械的特性、気孔率およびクリストバライト含有率などを評価した。粉末積層法の特徴は、リコートと造形を繰り返すことで造形物に異方性が生じることである。この異方性が造形物の特性に与える影響を調査するために、図7に示すとおり 3 × 4 × 40mm のサンプルを作製した。粉末の供給方向、造形軸方向に対する強度測定結果を図

8に示す。測定には3種類のサンプルを用いた。即ち、造形・焼成後のサンプル、それに加えてセラミックコア製造の通常工程である無機含浸処理をしたサンプル（以下、無機含浸）、更に、 casting 工程中のワックス射出圧力（図3）に耐えうる強度を保持するための有機含浸処理を施したサンプル（以下、無機有機含浸）である。

その結果（図8）、X軸方向、Y軸方向、Z軸方向で曲げ強度が異なり、積層しているZ軸方向が最も低いことがわかった。しかしながら、含浸処理により曲げ強度は増加し、無機有機含浸をすることでZ軸方向でも casting 工程に適用可能な 10MPa 以上を有することを確認した。

次に、造形方向による気孔率の変化を測定した結果を図9に示す。気孔率はアルカリ性水溶液への溶解性を左右するが、軸方向に差異なく無機含浸によって適正な 30% 付近に調整できた。続いて、図10にシリカ結晶相であるクリストバライトの含有率を示す。クリストバライトの含有率は XRD を用いて分析した。クリストバライト含有率と高温強度との間には相関性があり、クリス

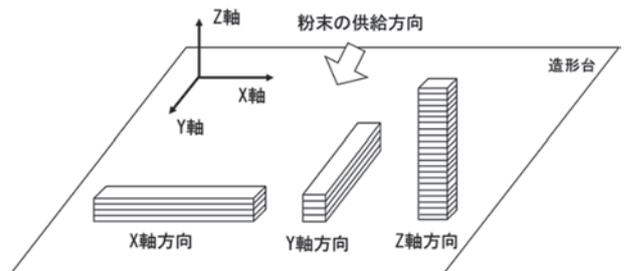


図7. 粉末の供給方向と造形軸方向

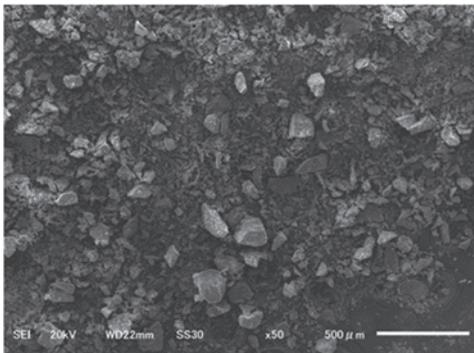


図5. 開発した粉末混合物のSEM像



図6. リコート性評価結果

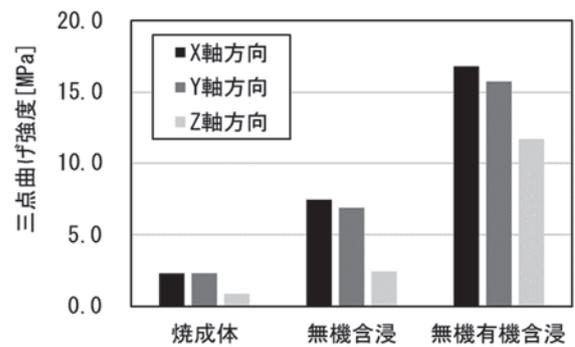


図8. テストピースの三点曲げ強度

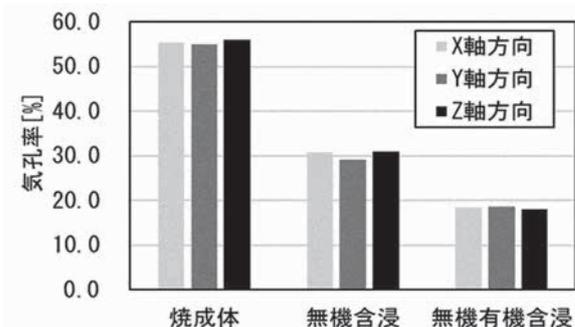


図9. テストピースの気孔率

トバライト含有率はセラミックコアにとって重要なファクターである。クリストバライト含有率が低いと高温強度が不足し、反対に高すぎると 220℃ 前後の相変化によってクラックが生じ易い^[9]。図 10 の結果は、射出成形で作製した場合と同程度のクリストバライトを含有し、軸方向の差異は無かったことを示している。

図 11 には焼成収縮率を示す。測定では、焼成前後の長尺方向の寸法変化を用いて算出した。焼成収縮率は 3% 程度であるが、軸方向でわずかに異なり Z 軸が最も収縮した。セラミックコアは鋳物の薄肉部で使用されるため、高い寸法精度が求められる。造形体は焼成収縮を見込んで造形するが、この軸方向の焼成収縮差を造形データに反映することで必要な寸法精度を得た。

最後に、粉末積層法の特徴である積層段差 (図 12 (a))

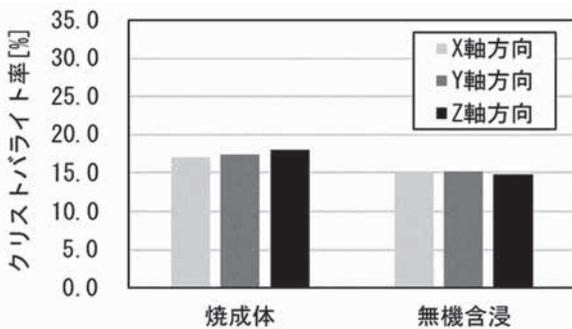


図 10. テストピースのクリストバライト含有率

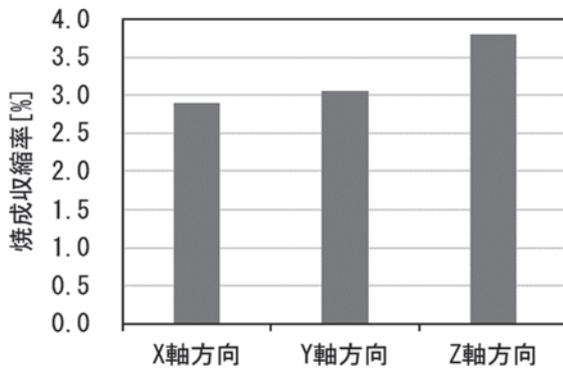


図 11. テストピースの焼成収縮率

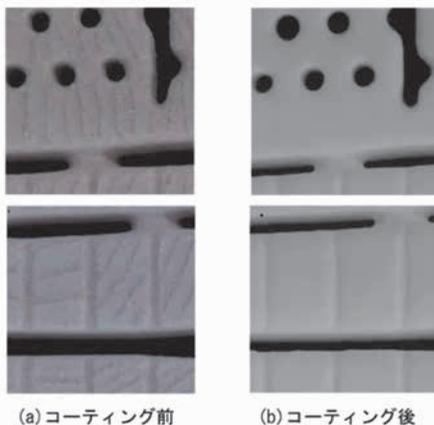


図 12. コーティング前後の表面

を無くすためにセラミックコア原料スラリーのコーティングを実施した。図 12 (b) に示すように積層段差が低減し、射出成形体の面粗さに近づいたことが分かる。

以上の試験結果を踏まえて、実際のガスタービンのブレード翼と同等サイズのセラミックコアを 3D プリンターにより作製した。図 13 にセラミックコアの外観と切断面を示す。寸法精度は実用的な品質レベルを満足した。切断面から分かるように、中央付近に内部空洞が存在しているが、このような形状は金型を用いる射出成形では不可能であり、3D 造形によって従来になかったブレード翼の作製が可能になった。

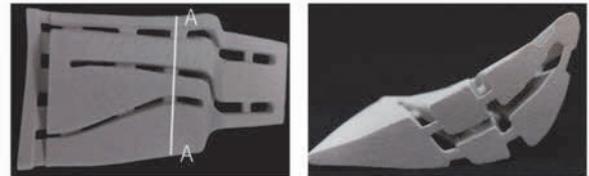


図 13. 3D プリンターで作製した複雑形状セラミックコア

4. まとめ

セラミックコアの製造プロセスへ 3D プリンターを用いる検討を行った。はじめに、セラミックコア材料と水溶性樹脂から成るリコート性に優れた粉末を開発した。作製したテストピースは、ロストワックス法に適した曲げ強度、気孔率、クリストバライト含有率を有することを確認した。そして、ガスタービンで使用されるタービン翼用のセラミックコアを試作し、良好な寸法精度で作製することができた。

射出成型法等の従来のセラミックコアの製造方法では、金型が必要であるため納期面でも形状面でも金型に制限を受けていた。本報告の 3D 造形法は、金型を用いないため、金型作製のための時間を削減できるため短納期化が期待できる。更に、金型では出来なかった複雑な形状も可能である。

今後のカーボンニュートラルに向けた省エネルギー化の中で、高効率な火力発電用ガスタービンの重要性は益々高まることが予測される。また、カーボンニュートラルの実現のために、水素タービン、アンモニアタービンの開発も進められている。以上の様な技術革新の中で、燃焼温度の高温化に伴うタービン翼冷却流路の複雑化を陰で支えるセラミックコアの新しい製造方法として、本報告の 3D 造形法は活用できるものと考えられる。

REFERENCES

- [1] IPCC, Climate Change 2021 the Physical Science Basis, 6 (2021)
- [2] 第 6 次エネルギー基本計画, 経済産業省 (2021)
- [3] 近江敏明, ターボ機械, 7 (5), 264-268 (1979)
- [4] ラピッドプロトタイピングによる精密鋳造用鋳造型および

中子の迅速造形技術の開発, 研究成果等報告書, 平成 24 年
3月, 社団法人日本鑄造協会

- [5] 「高付加価値セラミックス造形技術の開発」ホームページ,
<http://www.hcmt.website/>
- [6] 3D プリンターと造形材料の市場動向, シーエムシー リ
サーチ, 8-11 (2016)
- [7] 3D プリンター / 造形機の国内市場, 中日社, 44-57 (2021)
- [8] ロストワックス精密鑄造法, 日本鑄造協会ロストワックス
精密鑄造教本編集委員会, 37-43 (2015)
- [9] 加藤清隆, 鑄物, 62 (92), 726-731 (1990)