

令和5年度エネルギー需給構造高度化基準認証推進事業費
(省エネルギー等国際標準開発(国際標準分野))
(AM(付加製造) 鋳造用砂型の適正評価に関する国際標準化)

成果報告書

令和6年 2月 9日

再委託者 技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構

再委託先 兵庫県立工業技術センター

熱機械特性分析 (TMA) による熱間強度評価の検討

熱膨張率は、温度による鋳型の形状変化を評価し、鋳造時における鋳型の変形や歪の可能性あるいは、耐熱性、崩壊性を評価することができる。昨年度に引き続き、高温下での荷重変化に伴う変位を計測することにより、高温強度に係る物性評価の可能性について検討した。

○熱重量測定によるバインダー分解温度の検証

砂型 3Dプリンタで作製した砂型の一部を砕き、TG-DTA測定を空気下および窒素気流下(ともに 150ml/min)でそれぞれ行った(図1)。

空気雰囲気下では、449°Cで熱分解による発熱と重量減少がみられたことから、バインダーの分解温度が450°C付近であることを確認した。窒素雰囲気下では高温での重量減少は見られるものの、明瞭な発熱は見られないため、嫌気下ではバインダーの分解は抑えられており、高温では揮発によって重量減少していると考えられる。

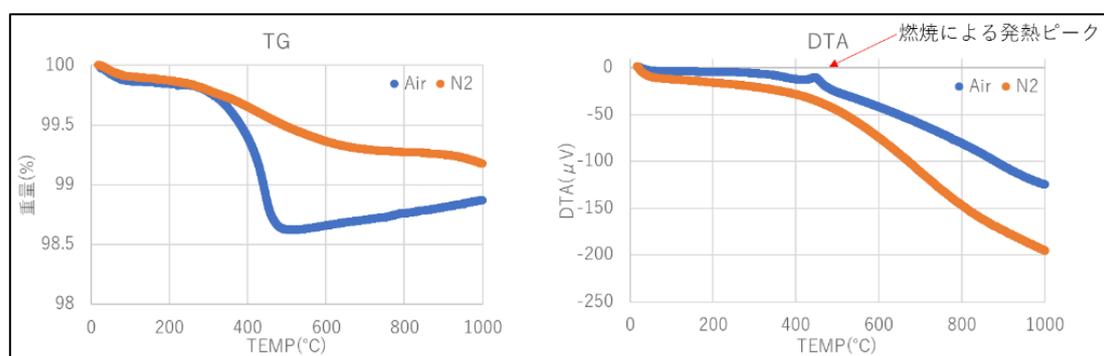


図1. TG(左)とDTA(右)の測定結果

○熱機械特性の評価

直径5mm、長さ20mmの円柱として砂型3Dプリンタで作製した試験片を、熱機械分析装置(TMA8310)(図2)を用いて、窒素気流下(150ml/min)において荷重50mNの条件で100°Cから900°Cまで100°C刻みで上限を上げていき測定を行った(図3)。

- ・検出方式： 示差膨張方式
- ・標準試料サイズ： $\phi 5$ (最大 $\phi 9$) $\times 10\sim 20\text{mm}$
- ・最大荷重： 1,000mN
- ・測定温度範囲： 室温 $\sim 1,773\text{K}$
- ・最大昇温速度： 100K/min
- ・測定レンジ： $\pm 0.5\sim \pm 2,500\mu\text{m}$
- ・測定雰囲気： 大気・不活性ガス・ガスフロー

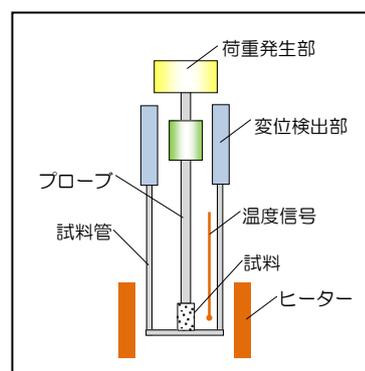


図2 熱機械分析装置(TMA8310)の仕様

砂型3Dプリンタ内造形エリアのX、Y、Z方向で作製した試験片を測定した結果、X方向は900°Cまで持ちこたえたものの、Y方向は530°C、Z方向は800°Cまでの測定しか成功しなかった。450°C \sim 500°Cで崩れてしまう試験片が多く、それ以上の温度で持ちこたえた試験片はわずかであった。成型時の軸方向による安定性の違いが

影響している可能性はあるが、各測定は n=1 での測定であり、再現性は確認できていない。多くの試験片が 450°C 付近で崩壊していることから、窒素気流下で測定しているものの、わずかに混入した酸素の影響でバインダーの分解が起こって崩壊した可能性が考えられる。また、これらの試験片は直径が小さく、砂粒子の影響により上下の面の十分な平滑性がでないことから、それによるわずかな傾きが原因で倒れたり崩れたりした可能性も考えられ、熱機械分析装置による 450°C 以上での再現性の高い測定は困難であることが分かった。

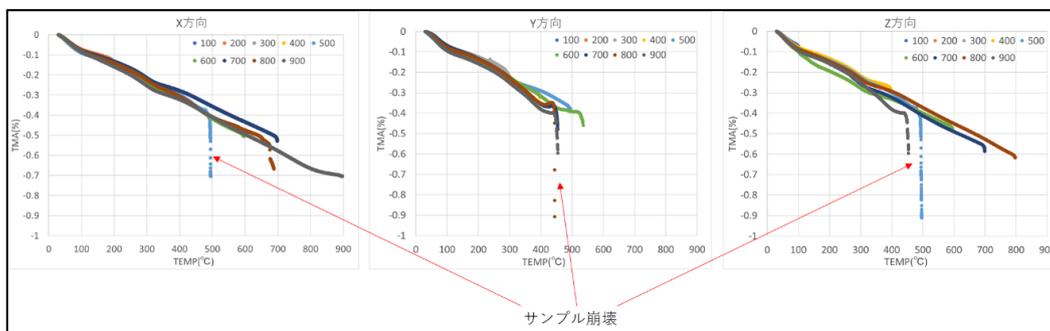


図3 荷重一定(50 mN)での熱膨張測定

次に、高温での砂型の強度を調べるため、温度一定で荷重を変化させる試験を実施した。X方向の試験片をそれぞれ 50mN の荷重をかけながら加熱し、400°C に到達後温度一定の条件で荷重を 50mN~900mN まで増加させた (図4)。また、試験片を倒れにくくするため、円柱に加えて角柱の試験片も用意し、再現性確認のため各3個の試験片を同条件で測定した (図5)。その結果、円柱試験片は3個中1個が途中の 440mN あたりで崩壊のに対し、角柱は3個とも 900mN まで崩れなかったことから、試験片が傾かず安定して自立する形状にすることが、測定の再現性を高めるために必要であることが示唆された。しかし、測定に成功した試験片のデータもグラフの概形は概ね似ているが、熱膨張率にはばらつきがあるため、定性的には評価できるが定量的な再現性を取るのには難しいことが分かった。

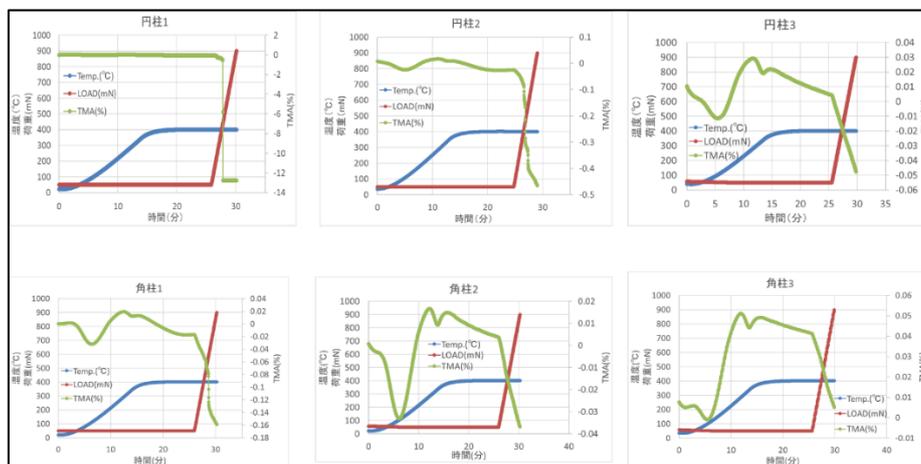


図4 400°Cでの荷重変化測定 (上段：円柱、下段：角柱)

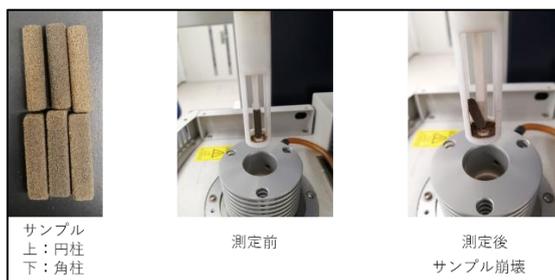


図5 試験片形状と測定前後の写真

プローブ型通気度試験への試験片提供等の技術支援

通気度測定用のプローブの開発のため、北海道立総合研究機構 工業試験場と連携して事業を進めた。通気度試験用の標準試験片として、従来の通気度試験片を参考に、 $\phi 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ の円柱試験片を標準とし、中心に $\phi 20\text{mm}$ の穴を空け中心部の厚みを段階的に変化させた試験片（図6）を設計し、砂型3Dプリンタを用いて造形、通気度評価を行った。

また、積層造形砂型の材料（砂、バインダ）を用いて、手作業で混練、木型（図7）を用いて作製した手始め試験片についても評価を行った（図8）。

通気度評価については、北海道総研 工業試験場からの報告によるが、中心部の厚みが10mm程度まで厚みと圧力差の相関が明瞭に認められ、通気度の評価に使えることがわかった。

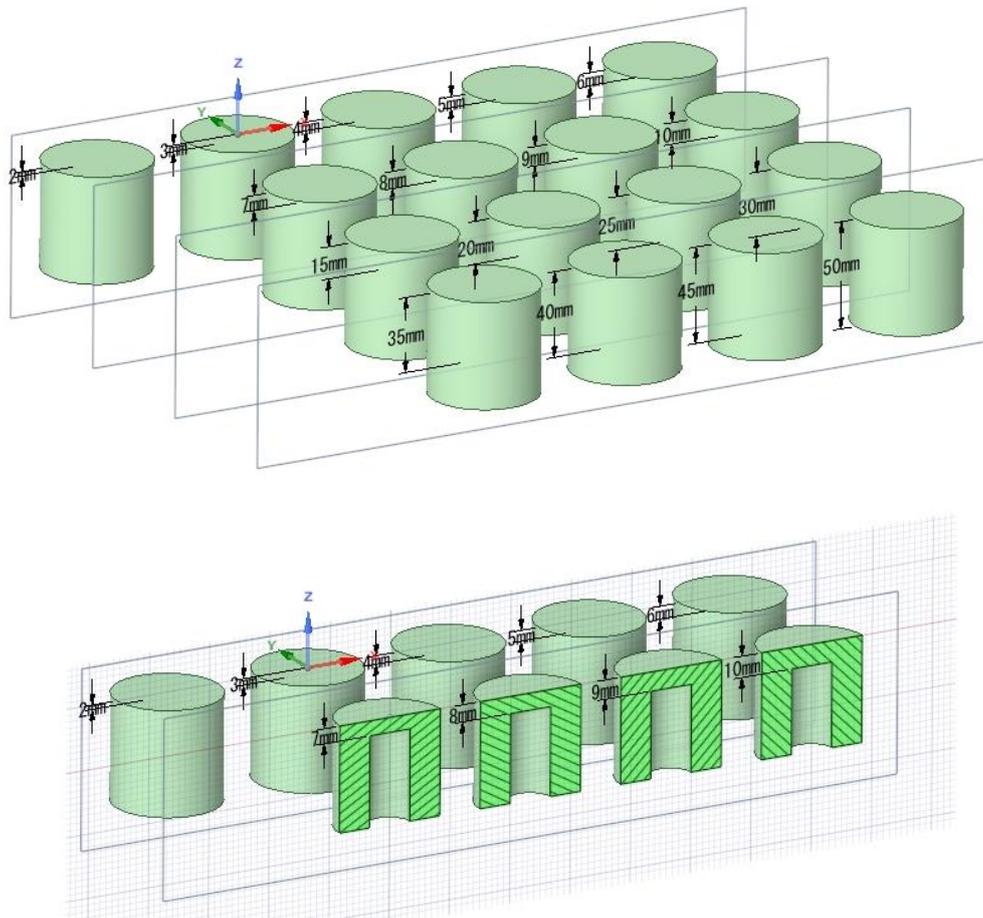


図6 プローブ型通気度試験 評価用試験片

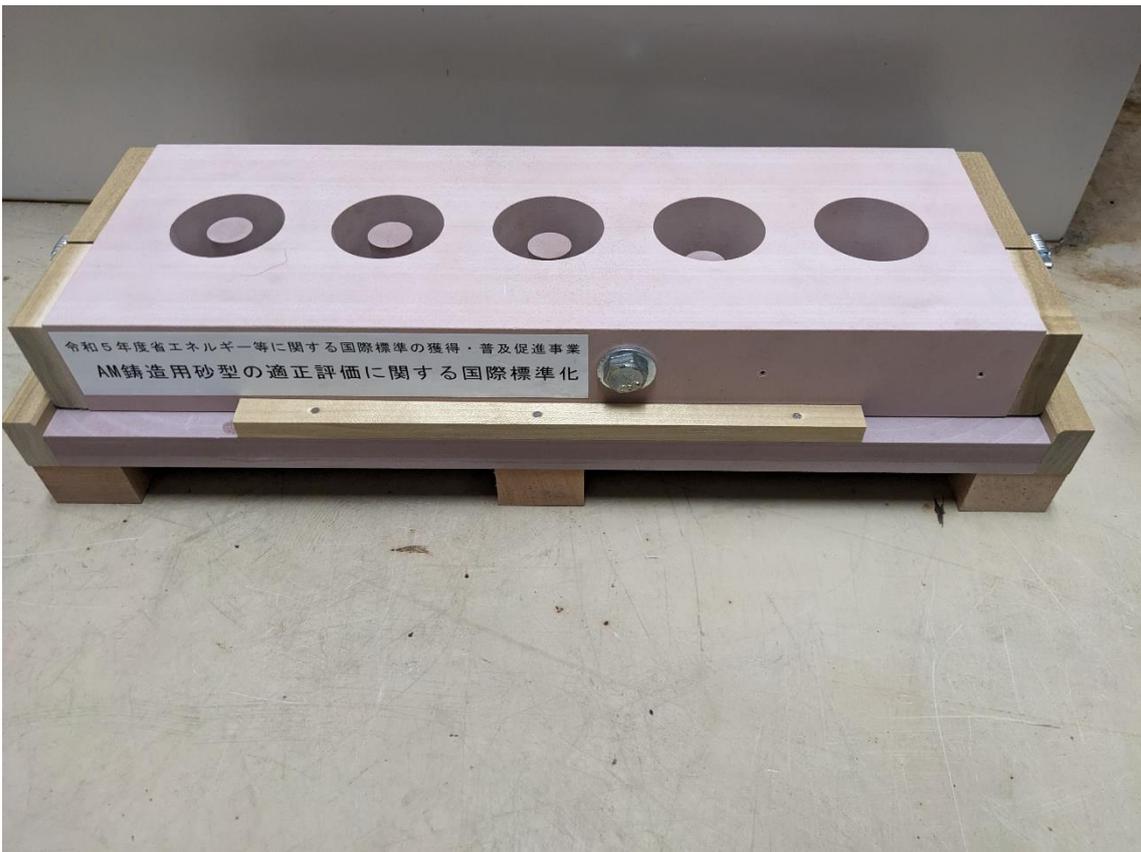


図7 手詰め砂型の作製に用いた混練機および木型

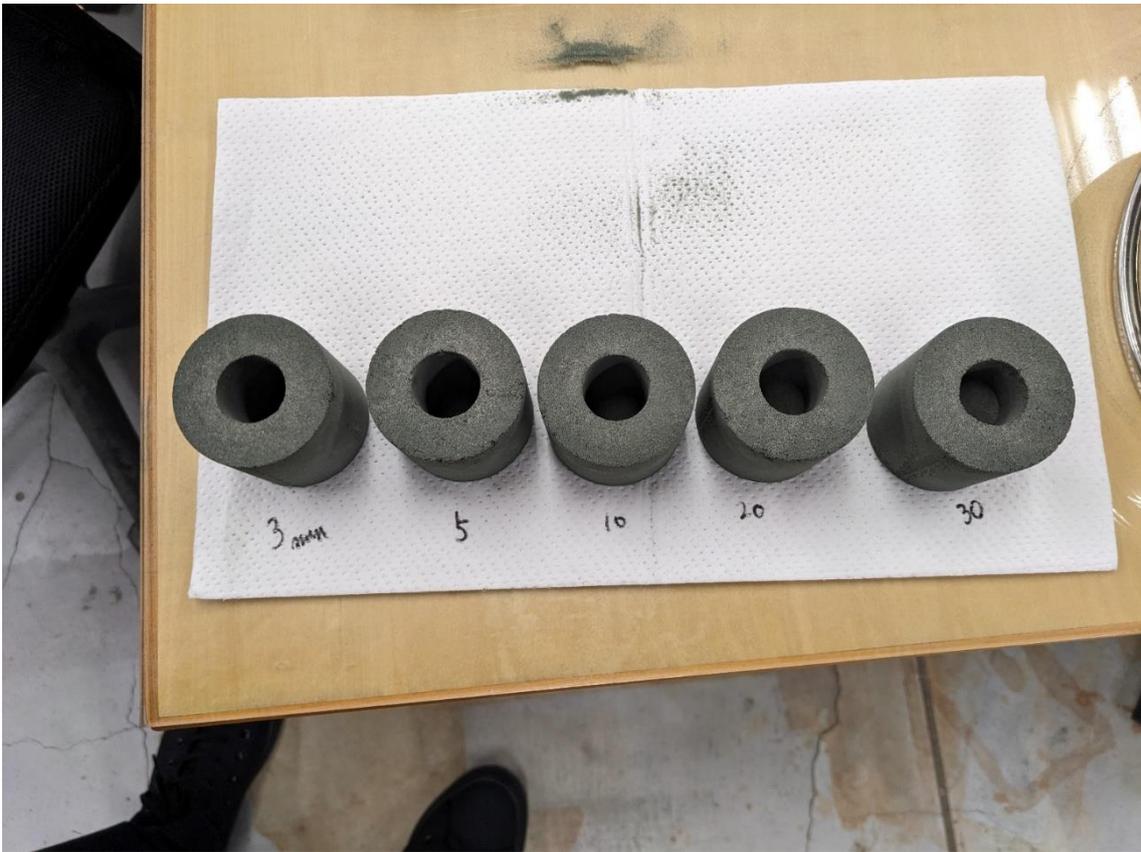


図8 プロブ型通気度試験 評価用試験片および評価試験機

プローブ型通気度試験の必要性についての技術調査

図9、10に、斜流インペラ用の積層造形砂型および同砂型を使って作製したインペラおよび組み込みポンプを示す。これらの砂型で製造したインペラ（鋳物）は既に実製品に使われており、短納期化の実現やインペラのバランス加工・調整の大幅な削減、当該インペラを搭載したポンプ性能の向上等多くのメリットが出てきている。図10に従来法（木型）および積層造形砂型で作製した鋳物の精度評価結果を示している。従来法ではCAD図面と比較して60～70%程度のフィット率であったものが、積層造形砂型では、90%まで向上しており、鋳造したインペラの形状精度も大きく向上し、バランス加工および再バランス調整作業が不要となり、作業工程・コストが削減されている。

ただし、砂型3Dプリンタの装置および材料のコストは依然として高く、使用する材料の低減や欠陥のない鋳物製品を確実に作製するために、鋳造シミュレーションの活用や積層造形砂型の特性評価を試験片ではなく実砂型でやれることが望ましい。

特に、材料の低減および通気性の確保のためには、鋳物形状に沿った図12のようなシェル状砂型の活用や図13のように従来法で作製した砂型との組み合わせ（ハイブリッド）により積層造形砂型を部分的に使うことも増えてくると考えられる。

従来の通気度試験では、特定形状の試験片（円柱）を用い、円筒内に設置し、空気の通過時間により評価しているが、実砂型での通気度試験はこの方法では不可能である。そこで、砂型にプローブを接触させ局所領域で評価が可能なプローブ型の通気度試験機および評価方法の開発が不可欠であると言える。

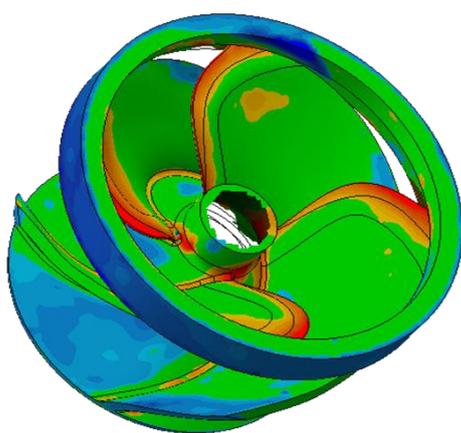


図9 インペラ用積層造形砂型

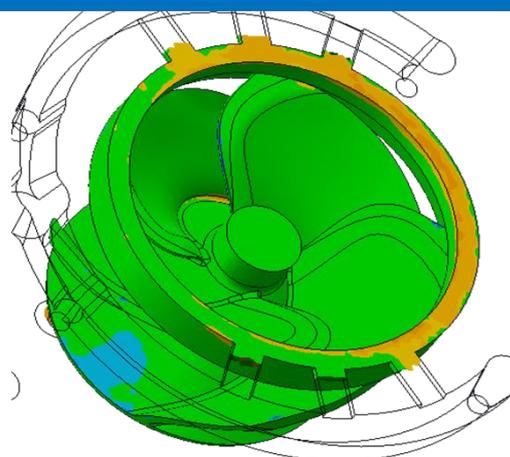


図10 積層造形砂型を使って作製したインペラおよび組み込みポンプ

造形精度の比較 (木型v.s.3Dプリンタ)
3DCADと造形物スキャン データ照合



一般木型 casting
60~70%



砂型 3D造形
90%

アンバランス量 木型 castingの1/3以下

図11 従来法 (木型) および積層造形砂型で作製した鋳物の精度評価



図 1 2 シェル状積層造形砂型



図 1 3 従来法（木型により手込め）砂型とハイブリッドさせた積層造形砂型（色が薄い方）