

2 高速かつ均等に加熱冷却可能な 3D 造形 大型 CFRP 成形用金型の開発

大川正巳, 松葉 朗*, 柳田大樹**, 北野幸一**, 石田幸平**

Development of 3D additive manufacturing large CFRP molding die
that can heat and cool at high speed and evenly

OKAWA Masami, MATSUBA Akira, YANAGIDA Daiki, KITANO Koichi and ISHIDA Kohei

We have developed a molding die for CFRTP that can be heated and cooled at high speed and uniformly. The molding die is made by bonding high thermal conductivity and low thermal conductivity material. Previously, the bonding has been made by Diffusion Bonding. But it is difficult to make a large mold by diffusion bonding. For automobile parts, a large molding die of about 1000mm square or more is required. In this study, Laser Metal Deposition which can make large dies was used to make molding die with a maximum height difference of 15 mm. The thermal uniformity of heating and cooling of the molding die was measured by thermography. As a result, we achieved uniform heating and cooling within 15 °C. In addition, the tendency of the temperature transition between the transient heat conduction analysis result and the experimental result matched.

キーワード：レーザ肉盛, 金型, ヒートアンドクール, 熱可塑性炭素繊維複合材料

1 緒 言

自動車業界では環境問題と燃費向上を背景に車体の軽量化が要求されている。自動車の軽量化材料として期待されている材料の一つに炭素繊維複合材料があり、その中でも生産性、リサイクル性に優れている熱可塑性炭素繊維複合材料 (CFRTP) に期待が高まっている。当センターでは CFRTP の成形技術としてプレス成形に関する技術開発を行ってきた。その技術の一つとして、CFRTP のヒートアンドクール成形用金型として高速かつ均等に加熱冷却できる金型の技術開発を進めてきた^{1),2)}。この金型は熱伝導性に優れる材料と劣る材料を組み合わせ、厚さの比率を適宜変えることによって、成形面の温度を高速かつ均等に加熱冷却できる金型である。従来は異なる材料を拡散接合で接合してきたが、金型の大型化への対応が困難であった。自動車部品に適用するためには 1000mm 角以上の金型が必要になる場合もある。金型の大型化に対応するため、熱伝導性に優れる材料をベースとしてその上に熱伝導性の劣る材料をレーザ肉盛溶接 (LMD : Laser Metal Deposition) して金型を作製することを検討した。CFRTP のプレス成形用材料としては、連続炭素繊維に熱可塑性樹脂を担持させた材料³⁾または半含浸させた材料⁴⁾や長繊維の炭素繊維と樹脂繊維で不織布にした材料⁵⁾が開発されている。いずれも室温で柔軟性に優れており賦形性に優れた材料である。これらの材料をヒートアンドクール成形することを想定して金型設計し、検証を試みた。

2 実験方法

2.1 金型の設計製作

図 1 に試作した金型の概略図を示す。三段の異なる形状とし、最上段と最下段の段差は 15mm とした。金型は銅合金 (中越合金鑄工 (株) CCM-B) をベースに成形面側に適宜厚みを変えて SUS316 を、最表面はステライト 21 を肉盛りした。銅合金は非磁性で高周波誘導加熱が困難なため、加熱側に強磁性の SUS420 を肉盛りした。LMD の光源の半導体レーザーの波長は 900~1,080nm であり、銅合金はこの波長の吸収率が低くそのままでは肉盛りできない。吸収率を改善するために肉盛り面に予め吸収率の高いコバルト系合金のめっきを施した。金型の加熱冷却は成形面の反対側に高周波誘導加熱コイルを配置して加熱、金型内部に冷却水路を配置して水冷した。

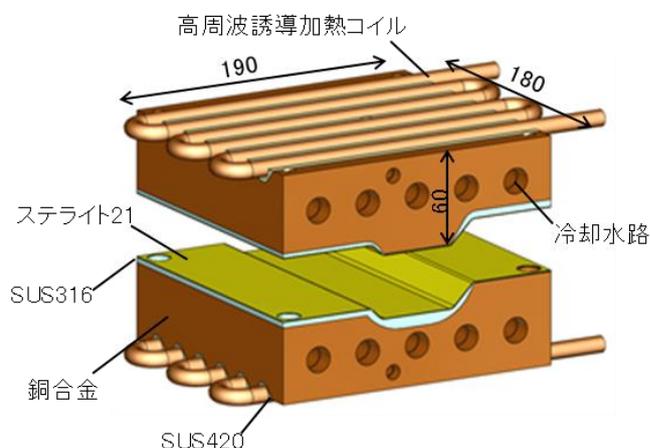


図 1 金型概略図

*東部工業技術センター, **株式会社野村鍍金

設計にあたり非定常熱伝導解析にて均等に加熱冷却できるように肉盛り厚さを決定した。また、上型下型とも加熱冷却が同じサイクルタイムとなるようにした。炭素繊維複合材料 CF/PA6 の成形を想定し、室温から 260℃ の加熱冷却工程で温度ムラ 15℃ 以内を目標に設計した。実験後に実験データを用いて設計に使用した解析モデルの妥当性を検証した。

2.2 金型加熱冷却と評価方法

図2に示すようなCFRTP セミプレグシートの成形サイクルを想定した加熱冷却実験を行った。出力 25kW の高周波誘導加熱装置（第一高周波工業㈱）で 260℃ まで加熱し 1 分間保持後、冷却水流量 5.4L/min で水冷するサイクルとした。図3に示すように金型の外周から 20mm 内側の成形面に黒体スプレーを塗布し、成形面の格段の中央を評価点 (a, b, c) として均熱性の評価をした。温度分布はサーモグラフィで計測した。



図2 想定する成形サイクル

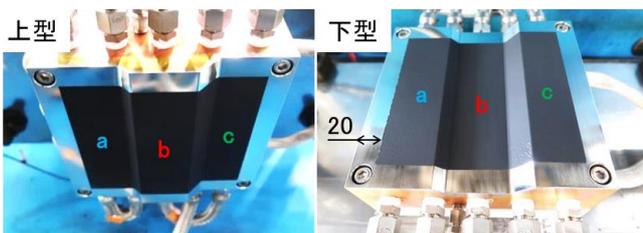


図3 黒体スプレー塗布状況と評価点

3 実験結果および考察

3.1 金型加熱冷却特性

金型の加熱冷却実験の温度推移とサーモグラフィ画像を図4に示す。上金型の最大温度時の温度ムラ ΔT は 10.5℃ であったが、冷却開始直前（温度保持 1 分後）には 3.3℃ となった。冷却過程では開始直後に 5.6℃ の温度ムラが生じた。下型は同様にそれぞれ 13.4℃, 5.5℃, 10.9℃ となった。従来の拡散接合で作製した金型²⁾と同様に、LMD で作製した金型でも上金型、下金型それぞれの温度ムラが極めて小さく抑えられている。

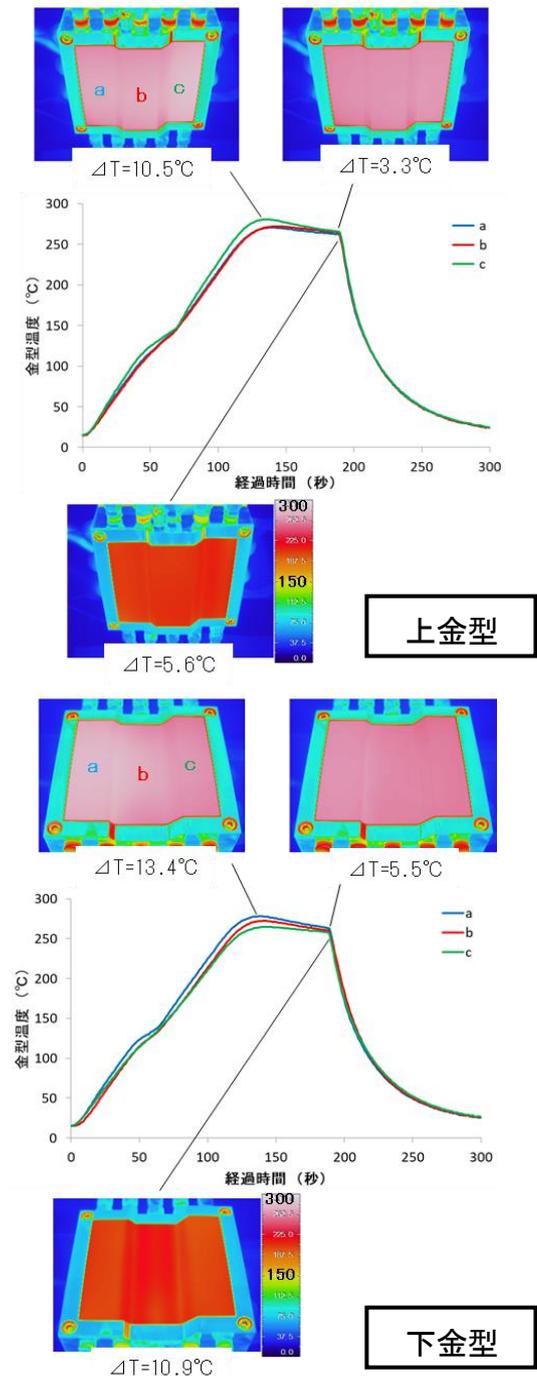


図4 金型温度推移と温度分布

CFRTP の成形では温度保持→加圧→圧力保持→冷却の工程 (図2参照) の温度管理が重要であり, その中でも樹脂が固化する融点を通る冷却の工程が極めて重要である。この工程に相当する冷却開始前後の上金型と下金型あわせての温度ムラと上金型中央温度の推移を図5に示す。冷却開始前の工程では冷却開始に向けて温度ムラが減少していき最終的に 5.7℃まで小さくなる。冷却開始 3 秒後に上金型中央温度 250℃付近で最大温度ムラ 13.8℃に達し, 6 秒後に PA6 の融点 225℃付近になると温度ムラは 10.4℃となりその後温度ムラは減少していく。上, 下金型あわせても温度ムラが極めて小さく抑えられていることがわかる。

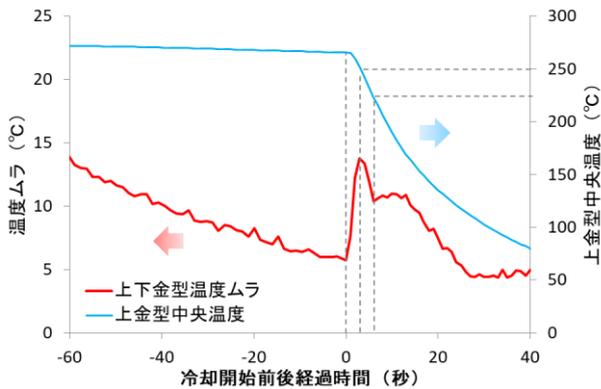


図5 金型温度ムラと温度推移

3.2 熱伝導解析

金型設計に用いた非定常熱伝導解析モデルを検証するために実験で取得した加熱冷却データをもとに再度熱伝導解析し実験結果と比較した。加熱は加熱終了時 (冷却開始直前) の温度が実験値と一致するように, 高周波誘導加熱の電力値を 65%に低減し熱流束として解析モデルに与えた。冷却は冷却水 5.4L/min の強制対流熱伝達として解析モデルに与えた。強制対流熱伝達率は円管の実験式である Colburn の式を参考に式(1)のように調整して計算した。

$$Nu=0.16Re^{4/5}Pr^{1/3} \quad (1)$$

Nu: ヌセルト数 Re: レイノルズ数 Pr: プラントル数

金型から環境への放熱として自然対流熱伝達と輻射による放熱も考慮して解析した。自然対流熱伝達率は一般的な実験式⁶⁾を用いて金型の側壁面は式(2), 成形面は式(3)として計算した。

$$Nu=0.59Ra^{1/4} \quad (2)$$

$$Nu=0.27Ra^{1/4} \quad (3)$$

Ra: レイリー数

放射率は黒体スプレー塗布部を 0.94, コバルト系合金, SUS316, SUS420 を 0.16, 銅合金を 0.1 として計算した。

上金型の非定常熱伝導解析の解析結果と実験結果を図6に示す。実験では昇温時 140℃付近で昇温速度が一時的に低下している。これは冷却水路内の冷却水が沸騰し気化熱により熱が奪われ生じたものと考えられる。解析ではこの現象を考慮していない。最大温度到達時のオーバーシュートは実験では解析と比較して大きく, その後冷却開始に向けて温度差は低下していく。解析では金型外部の配管をモデル化していないこと, 金型背面を完全断熱としたことなどのため放熱が小さくなり, オーバーシュートが低くなったと考えられる。実験の電力値を 65%に低減する必要があったのは, これらと高周波誘導加熱の発熱効率によるものと考えられる。

解析では最大温度時の温度ムラ ΔT は 8.7℃, 冷却開始直前には 2.0℃になっている。冷却では開始直後に冷却時最大の 3.7℃の温度ムラとなった。解析の温度ムラは図4での実験と比較して小さくなっているが, 温度推移は実験と解析で概ね一致しており温度推移と均熱性を解析により予測できることがわかる。

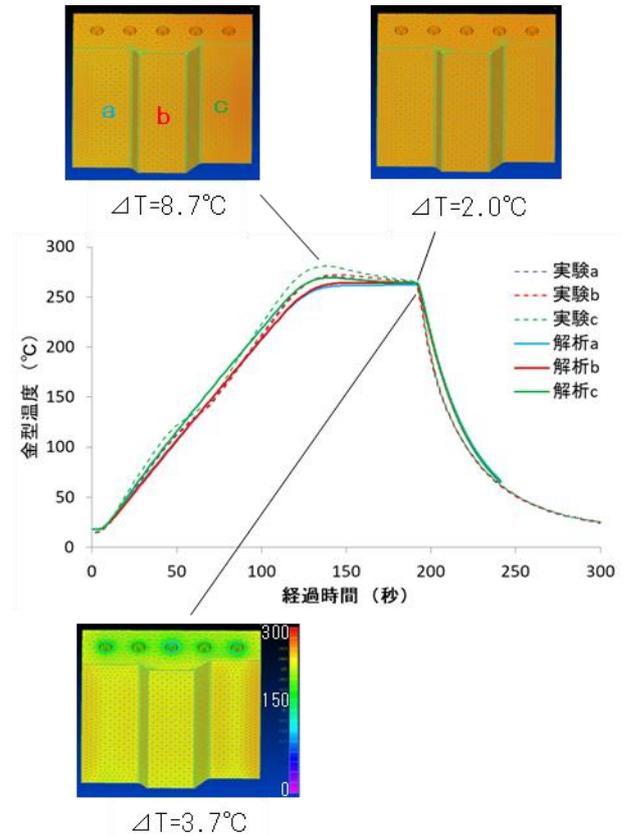


図6 金型温度推移と温度分布の熱伝導解析結果

4 結 言

熱伝導性に優れる材料と劣る材料を組み合わせで高速かつ均等に加熱冷却できる金型をレーザー肉盛り溶接(LMD)で作製し、均熱性の評価をした。目標とした上下金型あわせて15°C以内の温度ムラを実現した。また、非定常熱伝導解析の解析結果が実験結果と概ね一致し、温度推移と均熱性の予測が可能であることがわかった。

文 献

- 1) 特許第 5967834 号
- 2) 松葉他：第 7 回複合材料会議 (JCCM-7) (2016) , 2A-02
- 3) <https://www.chubu.meti.go.jp/c32automobile/180105/siizusyuu2017.pdf>, 33
- 4) <https://www.chubu.meti.go.jp/c32automobile/180105/siizusyuu2017.pdf>, 27
- 5) <https://www.awapaper.co.jp/products/detail/cfrp.html>
- 6) YUNUS A. CENGEL: Heat Transfer; A Practical Approach [2nd Edition] (2002), 468