

薄板状複合材料の光加熱援用ダイレスハンマリング成形

福井大学 学術研究院 工学系部門 機械工学講座

講師 岡田 将人

(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014012)

キーワード：複合材料，光加熱，ダイレス成形，ハンマリング

1. 研究の目的と背景

高比強度，耐疲労特性，耐食性を有する炭素繊維強化樹脂(以後，CFRP)などの繊維強化複合材料が工業用部材として注目を集めて久しく，近年では，自動車用構造材や建築部材等の大量生産品への適用のケースが増えてきている¹⁾。CFRP は，用いる樹脂により熱硬化性炭素繊維強化樹脂(以後，CFRTS)と熱可塑性炭素繊維強化樹脂(以後，CFRTP)に大別される。CFRTS は，熱硬化性樹脂の加熱することで生じる不可逆的な化学反応(架橋反応)を利用したものである。その成形には，予め金型に炭素繊維を配置させ，そこに熱硬化性樹脂を供給する Resin Transfer Molding 法等の方法が用いられるが，これらは生産性の観点から主に少量高付加価値製品のみへの適用に限られていた。これに対し近年では，自動車構造材，建築部材等の大量生産品への適用を見据えて，加熱することで軟化し，冷却することで固化する可逆的な特性を有する熱可塑性炭素繊維強化樹脂(以後，CFRTP)の活用が期待されている。CFRTP は，その特性から板などの素形材からプレス機等による高速成形が可能であり，その成形法は，可塑性を得るための加熱機構を設ける必要があるものの，これまでの金属板材を対象としたものと同様の加工機構が適用できる。この優位性に着目した CFRTP のプレス成形法の研究が，これまでも盛んに行われている^{2), 3)}。今後は，工業製品の金属材料から CFRP への素材転換の動きが加速するとみられ，それに比例して産業界における CFRTP の供給能力ならびに流通の増加が見込まれる。そのような中で，試作やプレス成形品に対する追加工に対応可能な薄板状の CFRTP のダイレス成形のニーズも高まりを見せると考えられるが，それらに向けた取り組みはみあたらない。

一方，金属板材を対象とした代表的なダイレス成形法に球頭パンチによるインクリメンタル成形法があり，既に実用に供されているとともに，種々の方法が現在も開発されている⁴⁾。これを CFRTP 板材に適用する場合，プレス成形と同様に加工点の可塑性を得るための加熱機構

を必要とするが，同様の加工機構を応用することが可能と考えられる。

そこで，本研究では不連続繊維の CFRTP 板材をハロゲンランプによる光加熱により，局部的に可塑性を発現させながら，その可塑性領域を往復運動するパンチにより逐次成形する光加熱援用ダイレス成形法を提案し，成形装置を開発した。加えて，本成形法の有用性を基礎的な成形形状により検討したので報告する。

2. 加工法概略

図 1 に本研究で開発した光加熱援用ダイレス成形法の模式図を示す。本成形法では，薄板状の CFRTP 板材の外縁部をブランクホルダにより拘束する。その CFRTP 板材に下面よりハロゲンランプにより加熱することで，円形状の可塑性領域を得る。加えて，ハロゲンランプの光軸と同軸上に，工作物を挟んで対向する位置に設けられた往復運動する成形パンチを工作物上面より押し込むことで，成形パンチの球頭形状を工作物に転写させる。これを，X-Y 平面状で連続的に実施することで成形パンチの送り軌跡に倣った所望の成形品形状を得ようとするものである。本成形法の特徴として，成形パンチを短周期で往復させることで，加熱された CFRTP 板材との接触時間

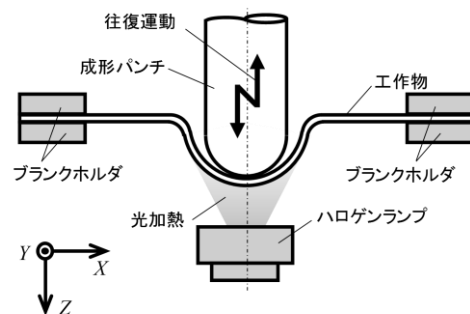


図 1 光加熱援用ダイレス成形法概略

を最小化し、工作物から成形パンチへの熱伝導による温度低減を抑制し、温度による変形抵抗への影響が顕著な CFRTP 板材の安定した可塑性の維持が期待できる。また、加熱した CFRTP の表面上を X, Y 方向に成形パンチが摺動すると、軟化した樹脂材料が成形パンチに溶着し、成形不良を招く懸念がある。これについても、成形パンチを往復させることで、樹脂材料の溶着による成形不良の抑制効果が期待できる。さらに、ハロゲンランプにより成形部のみを選択的に加熱することで、工作物の外縁部のみをブランクホルダにより拘束しているのみであるが、非加熱領域は可塑性を示さないため、可塑性領域のみを選択的に成形することが可能となる。なお、本成形法をハンマリング成形と称しているが、これは、成形パンチの往復機構を指したものであり、金属材料を対象とした鍛金のような工作物の材料特性の改善効果を指したものでないことを付言する。

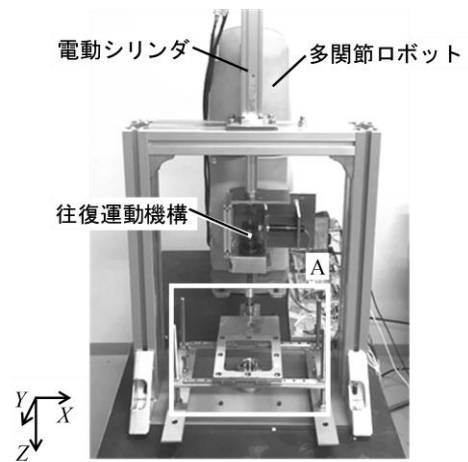
3. 実験方法

3.1 実験装置

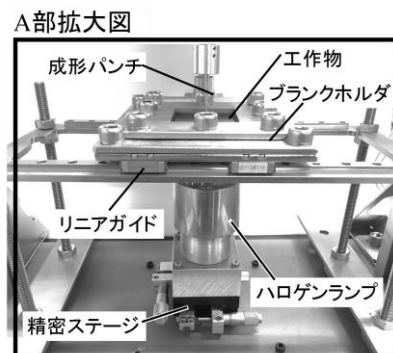
図 2(a), (b)に本実験で製作した光加熱援用ダイレス成形装置の外観写真と成形部の拡大写真を示す。図 2(a)に示すように、成形装置は主に多関節ロボット、電動シリンダ、往復運動機構、成形部(A 部)から構成される。図 2(b)に示すように、成形部(A 部)は主にブランクホルダ、リニアガイド、ハロゲンランプならびに精密ステージから構成されている。多関節ロボットは、X-Y 平面状の工作物の移動のために用いられており、X, Y 方向に設置された 2 方向のリニアガイド上に固定されたブランクホルダを X-Y 平面上で送ることで、工作物の加熱・成形領域を相対的に移動させることが可能になる。往復運動機構は電動シリンダに固定されており、一定ストロークで往復する成形パンチの Z 軸方向の送り、位置決めが可能となっている。なお、工作物を下面から加熱するハロゲンランプは精密ステージ上に固定されており、成形パンチの中心軸と光軸を高精度に一致させることを可能にした。図 3 に往復運動機構の外観写真を示す。成形パンチは、DC モーターとカム機構によるばねの収縮と、その反発力により往復運動を実現させた。

3.2 工作物

表 1 に本研究で用いた工作物の主な仕様を示す。工作物には、繊維長が 0.3 から 0.5mm 程度の不連続短繊維を、熱可塑性樹脂であるポリアミドにより含浸させた CFRTP 板材を用いた。



(a) 装置外観



(b) 成形部拡大

図 2 光加熱援用ダイレス成形装置

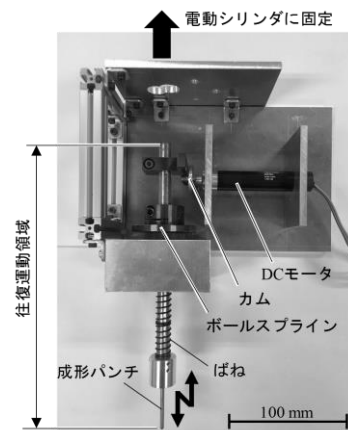


図 3 成形パンチの往復運動機構

表 1 工作物仕様

炭素繊維	不連続短繊維
繊維長	$l_f = 0.3 - 0.5 \text{ mm}$
マトリクス(樹脂)材料	ポリアミド (PA6)
繊維体積含有率	$V_f = 20 \%$
寸法	$70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$
厚さ	$t = 1.5 \text{ mm}$

表 2 実験条件

パンチ半径	$R_p = 2.5 \text{ mm}$
押し込み深さ	$d_p = 1.0 - 11.0 \text{ mm}$
パンチストローク	$S_c = 8 \text{ mm}$
ばね定数	$C_s = 0.86 \text{ N/mm}$ (予荷重なし)
ハンマリング速度	$f = 5 \text{ Hz}$
ハンマリング時間	$\tau = 10 \text{ s}$

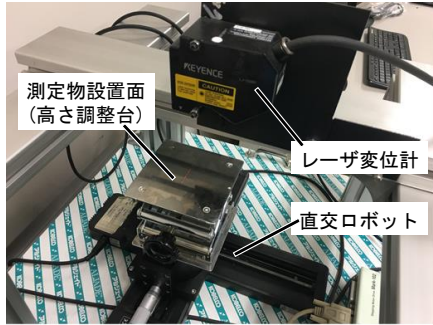


図 4 成形部形状測定機

3.3 実験条件

表 2 に主な実験条件を示す。成形パンチは球頭形状とし、工作物上面からの押し込み深さを 1.0 mm ごとに変化させた。本研究において、押し込み深さとは、工作物上面から、8.0 mm のストロークで往復運動する成形パンチの下死点までの Z 軸方向の距離と定義した。また、本研究では、基礎的な成形特性を詳細に明らかにするために、X-Y 平面状の送りは与えず、Z 軸方向への押し込みによる成形形状に着目した。設定の押し込み深さで成形パンチを往復運動させながら、その位置で往復運動機構を 10 秒保持した後の成形品形状を検討対象とした。

3.4 測定方法

図 4 に、成形部形状を測定するための測定装置外観を示す。成形部の形状はレーザ変位計と 2 軸の直交ロボットを組み合わせた非接触式の測定機であり、工作物上面より、その輪郭形状を測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 光加熱による工作物温度分布

本成形法では、スポット状に加熱するハロゲンランプを用いて、工作物の可塑性を発現させる。そこで、工作物下面から加熱した場合の、工作物上面の温度分布を光軸中心から放射状に測定した。図 5 にその結果を示す。温度は 5 点測定の平均値を示している。本研究では、R2.5 の球頭形状の成形パンチを用いており、その成形パンチを押し込むには理論上、成形パンチの中心軸から直径 5.0 mm の領域において、工作物が可塑性を示すことが必要となる。一方、本研究で用いた工作物は概ね 200 °C で可塑性が発現することを予備実験で明らかにしている。そこで本研究では、光軸中心から 3.0 mm の位置が可塑性を

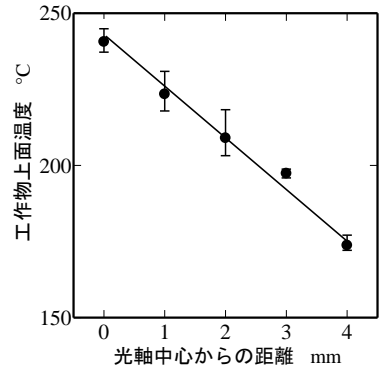


図 5 光加熱による光軸中心からの温度分布

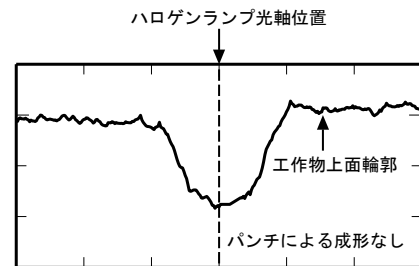


図 6 光加熱後の加熱領域の輪郭形状

示す 200 °C となるようにハロゲンランプの出力を調整し、その際に得られた工作物上面の温度分布を測定した。図より、温度分布は概ね直線的な関係を示しており、光軸中心では 240 °C 程度に達していることがわかる。また、光軸中心から 4.0 mm の位置では 175 °C 程度であり、この位置において工作物が可塑性を示さない場合、局所的な成形が期待できる。

図 6 に、図 5 の実験後に得られた加熱領域の形状測定結果を示す。本結果は、加熱のみを行った工作物の形状であり、パンチによる成形は行っていない。図より、パンチによる成形を行ってなくても、工作物上面には 1.0 mm 程度の凹形状が認められた。これは、光加熱により局所的に加熱領域のみが軟化したとともに、熱膨張したことにより生じたものと考えられる。このことから、本領域を成形パンチにより 1.0mm 以上の深さで押し込むことで、成形パンチの形状を転写させ、成形パンチの形状に倣った成形部形状の獲得が可能になると考える。

4.2 押し込み深さが成形高さに及ぼす影響と成形限界

図 7 に、種々の押し込み深さにより得られた成形品の成形高さを示す。本研究で成形高さとは、図 8 に示すように、工作物上面の初期位置から成形領域の最深部までと定義し、成形品形状測定結果より得られた値を示している。図より、押し込み深さ 3.0 mm 程度までは、押し込み深さに倣った成形高さが得られている。これより、押

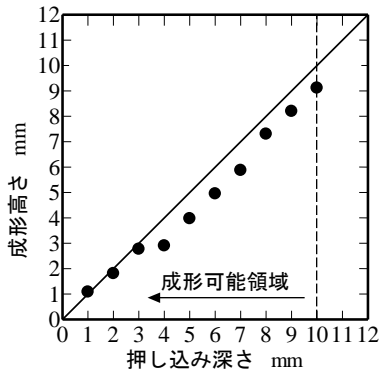


図7 押し込み深さと成形高さの関係

押し込み深さが低い領域においては、押し込み深さに応じた成形高さが得られるといえる。また、押し込み深さ 1.0 mm においては、押し込み深さよりも若干、成形高さが高いことがわかる。これは、図 6 に示したように、パンチによる成形を実施しなくても、加熱により 1.0 mm 程度の形状変化が認められたことに起因すると考えられ、成形パンチと工作物の接触は概ね押し込み深さ 2.0 mm 以降の領域で生じていると考えられる。加えて、押し込み深さ 4.0 mm 以降においては、押し込み深さよりも概ね 1.0 mm 程度減少した成形高さが得られていることがわかる。比較的、押し込み深さが深い領域では、押し込み深さよりも、得られる成形品高さが低くなることがわかる。なお、本条件では押し込み深さ 11.0 mm において、成形品が破断して成形不良となった。このことから、本条件では押し込み深さ 10.0 mm が成形限界といえ、得られる成形品高さは 9.0 mm 程度となることがわかった。図 9(a), (b)に、図 7 の実験において、成形可能領域である押し込み深さ 9.0 mm により得られた成形品と、成形品に破断が生じた押し込み深さ 11.0 mm における成形品の外観を示す。図 9(a)より、局所的に成形パンチ形状に倣った成形部が認められる。また、図 9(b)より、本加工法による成形品の破断は成形パンチ形状におけるパンチ肩部から側壁部にかかる領域において生じていることがわかる。本加工法は、局所的な加熱により加熱部のみ可塑性を付与する。そのため、可塑性が発現していないフランジ部に相当する加熱部周辺領域から成形領域への材料流動は得られない。そのため、成形部の工作物は Z 軸方向への伸びに応じて薄肉化することとなり、これが成形部の破断につながるものと考えられる。

4.3 押し込み深さが成形部形状に及ぼす影響

図 10(a)-(d)に、種々の押し込み深さにより得られた成形部形状を示す。いずれも図 7 の実験で得られた成形品の測定結果である。図中には、各押し込み深さにおける下死点位置の成形パンチの輪郭形状も併せて示す。最も

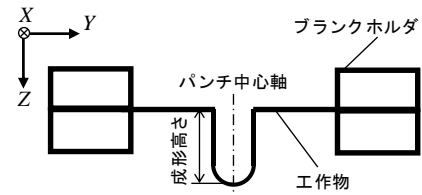
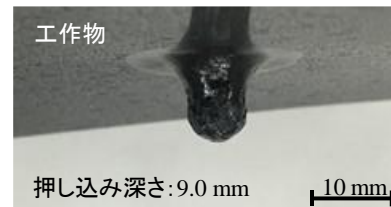
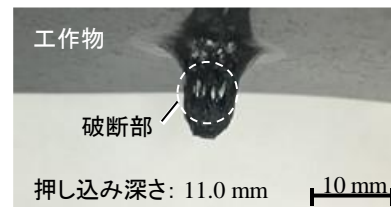


図8 成形高さの定義



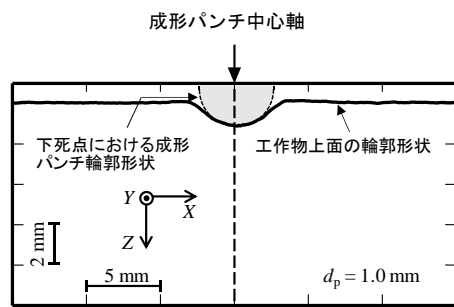
(a) 成形成功例



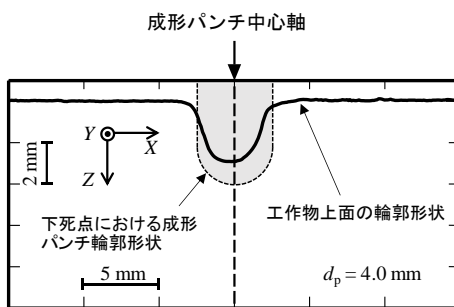
(b) 破断例

図9 成形部外観と破断部

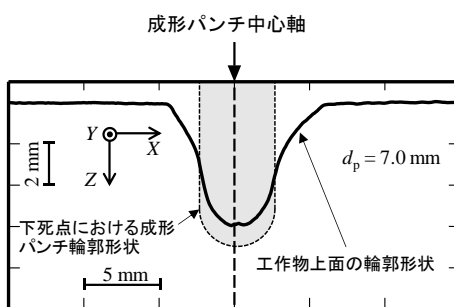
小さな押し込み深さ 1.0 mm においては、概ね下死点における成形パンチの輪郭形状に倣った成形部形状が得られていることがわかる。これに対し、図 7 に示すとおり、押し込み深さに対して成形高さが明らかに小さくなった押し込み深さ 4.0 mm, 7.0 mm においては、図 10(b), (c)にみるように、成形パンチの輪郭形状に対して得られた成形部の高さが小さいことがわかる。図より、成形パンチの球頭形状は成形部に転写されていることがわかる。本研究で用いた成形パンチの往復運動機構は、図 3 に示すとおり、押し込み時はばねの反発力を利用したものである。そのため、成形パンチの押し込み方向の作用力よりも大きな工作物の変形抵抗が生じた場合、成形パンチは下死点まで到達しないこととなる。これにより、押し込み深さよりも小さな成形高さとなったと考える。一方、押し込み深さ 10.0 mm においては、成形部形状が軸対称形状となっていないことがわかる。成形品外観を確認したところ、過熱によるものと思われる成形部表面の荒れが認められた。これは、押し込み深さの増加に伴う成形部とハロゲンランプ間の距離の減少により、成形部が過熱されたことによる影響と考えられる。今後は、成形過程における成形部の温度制御についての検討が必要と考える。



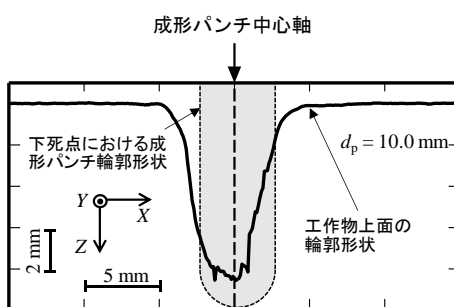
(a) 押し込み深さ 1.0 mm



(b) 押し込み深さ 4.0 mm



(c) 押し込み深さ 7.0 mm



(d) 押し込み深さ 10.0 mm

図 10 押し込み深さと成形部形状の関係

5. 結 言

ハロゲンランプによる光加熱を用いて熱可塑性の炭素繊維強化複合板材のダイレス成形を目的とした新たな加工

工法を開発し、その有用性を単純形状により評価した。本研究より得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 工作物外縁部をブランクホルダにより固定し、工作物下面よりハロゲンランプにより加熱することで、選択的に工作物の可塑性領域を発現させ、工作物上面側より往復運動する成形パンチにより、その領域を成形できる加工機を開発した。
- (2) 工作物下面からの加熱による工作物上面の温度分布を測定したところ、ハロゲンランプの光軸からの距離による温度低下は直線的であった。
- (3) 成形パンチによる押し込み深さと、得られた成形部の高さを比較したところ、押し込み深さ 3.0 mm 程度までは、押し込み深さに倣った成形高さが得られたものの、押し込み深さ 4.0 mm 以降は、それよりも 1.0 mm 程度小さな成形高さとなった。
- (4) 本実験での成形限界は、10.0 mm であり、それ以降の押し込み深さでは、成形パンチの肩部から側壁部にかかる領域で、工作物に破断が認められた。
- (5) 成形限界付近の成形部の輪郭形状は、過熱によると思われる不規則な変形が認められた。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-2014012) によって行われたことを付記するとともに、記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 長塚渉, 松尾剛, 村上岳, 平野啓之, 不連続繊維分散系 CFRTP の曲げ弾性率における温度依存性予測, 日本複合材料学会誌, 41, 3 (2015) 75-84.
- 2) S. Hineno, T. Yoneyama, D. Tatsuno, M. Kimura, K. Shiozaki, T. Moriyasu, M. Okamoto, S. Nagashima, Fiber deformation behavior during press forming of rectangle cup by using planes weave carbon fiber reinforced thermoplastic sheet, Procedia Engineering, 81 (2014) 1614-1619.
- 3) D. Soulat, A. Cheruet, P. Boisse, Simulation of continuous fiber reinforced thermoplastic forming using a shell finite element with transverse stress, Computer & Structures, 84 (2006) 888-903.
- 4) 高杉敬吾, 浅川直紀, 田中秀岳, 岡田将人, 薄板のインクリメンタルハンマリング張出し成形に関する研究 (加工経路の分類とひずみ分布の実験的考察), 日本機械学会論文集 C 編, 78 (2012) 3759-3767.