

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：32407  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20K04212  
研究課題名(和文)炭素繊維強化熱可塑性樹脂シートの加熱・冷却ハイブリッド射出成形現象の実験解析

研究課題名(英文) Experimental Analysis of Heat and Cool Hybrid Injection Molding Phenomena in Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Sheet

研究代表者  
村田 泰彦 (Murata, Yasuhiko)  
日本工業大学・基幹工学部・教授

研究者番号：00200303  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：連続繊維の炭素繊維強化熱可塑性樹脂CFRTPシートを、輻射加熱を用いて軟化させた状態で圧縮成形により一次成形をした後に、短炭素繊維強化熱可塑性樹脂を重ねて射出成形することによってリブ等の複雑形状を成形するハイブリッド射出成形法が実用化されている。さらに、金型をシート母材の融点以上に加熱して成形を行う加熱・冷却ハイブリッド射出成形法が提案されている。後者の成形現象を大学研究室において簡易的に実験解析するために、赤外線ヒータを用いてCFRTPシートと金型を同時に加熱できる成形方法を開発した。そして本方法によりこれまで研究が行われてこなかった上記ハイブリッド成形品の表面欠陥の生成原因を明らかにした。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した金型と成形方法は、これまでに学術的に解明がなされてこなかったプラスチック成形加工の最先端技術であるCFRTPシート加熱・冷却ハイブリッド射出成形法の加工現象をはじめて明らかにできる研究ツールと言える。また、本方法による成形不良現象の解析結果は、ハイブリッド成形品の付加価値向上に寄与するものと言える。今後、本方法によりCFRTPシートだけに留まらず、金属等の異種材料とのマルチマテリアル化技術確立のための知見や指針が得られるものと期待される。このように本研究は、金属加工等に比べて遅れをとっていたプラスチック成形加工の学問体系の構築に貢献し、学術的かつ社会的意義が大きいものと考えている。

研究成果の概要(英文)：A hybrid injection molding is used in industry to form three-dimensional shapes such as rib by primary molding a CFRTP sheet of carbon fiber-reinforced thermoplastic using continuous fibers by compression molding while the sheet is softened using radiation heating, and then injecting a layer of short carbon fiber-reinforced thermoplastic on the primary molded product. Furthermore, a heating and cooling hybrid injection molding has been proposed in which molding is performed while the mold cavity surface is heated to a temperature higher than the melting point of the base material of the sheet. In order to perform a simple experimental analysis of the heating and cooling hybrid injection molding phenomena in a university laboratory, a molding method was developed that can heat both the CFRTP sheet and the mold using an infrared heater. Using this method, the cause of the generation of surface defects in the hybrid molded products, which had not been studied before, was clarified.

研究分野：プラスチック成形加工 金型 計測

キーワード：プラスチック 金型 炭素繊維強化熱可塑性樹脂シート 加熱・冷却ハイブリッド射出成形 赤外線ヒータ 輻射加熱 成形不良

## 1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化熱樹脂 CFRP は、軽量で、かつ、強度に優れているために、釣竿から航空機や自動車の構造部品まで用途が拡大している<sup>1)</sup>。CFRP は、プリプレグ状または織物状の連続繊維と熱硬化性樹脂との複合化が主流となっており、比較的単純な板状や筒状の製品への適用に留まっていた。しかし、数百  $\mu\text{m}$  から数 mm オーダーの短い繊維で強化された炭素繊維強化熱可塑性樹脂 CFRTP が登場し、射出成形が適用できるようになると、形状自由度が増して複雑な立体形状の製品の大量生産が可能となった。ただし、短繊維は、連続繊維に比べて補強効果が劣り、その結果、製品の機械的強度が低くなることが問題となっていた。このような現状を鑑み、近年、連続繊維と短繊維のそれぞれの特長を活かして、比強度の高い複雑な立体形状成形品を製造する技術が提案されている。具体的には、連続繊維の CFRTP シートを、輻射加熱を用いて軟化させた状態で圧縮成形により一次成形をした後に、一次成形品の上に短炭素繊維強化熱可塑性樹脂を重ねて射出成形することによってリブなどの複雑な形状を成形するハイブリッド射出成形法が実用化されている<sup>2,3)</sup>。本成形法では、圧縮時にシートが低温の金型キャビティ面に接触して冷却固化されキャビティ面への転写性が低下するため、高い外観品質が要求される成形品の製造には適用が困難であった。そこで、金型キャビティ面をシート母材の樹脂の融点よりも高い温度に加熱して成形を行う加熱・冷却ハイブリッド射出成形法が提案されている<sup>4)</sup>。加熱・冷却を行わないハイブリッド射出成形法では、CFRTP シートと射出成形樹脂との界面の接着強度<sup>5)</sup>や成形品の変形<sup>6)</sup>に注目した研究が行われているが、一方、加熱・冷却ハイブリッド射出成形法に関する研究事例がほとんど見当たらず、特に、シートへの金型キャビティ面形状の転写などの加工現象が明らかにされていない。そのため、成形品の形状・寸法精度や表面性状の低下、ガス焼けなどの成形不良が発生すると、抜本的な対策がはかれないのが実状であった。金型の加熱・冷却を行うためには、金型内に冷熱媒体を交互に循環させる方法<sup>7)</sup>などを適用する必要があり、複雑かつ大規模な金型と装置が必要となる。これが、大学研究室において学術的に本成形法の加工現象の実験解析を行うことを困難にしている。著者は、これまでに赤外線ヒータと立体キャビティプレートを用いて金型キャビティ面を簡易的に加熱できる加熱・冷却射出成形金型を提案し、金型キャビティ面の加熱が各種繊維強化熱可塑性樹脂成形品の外観に及ぼす影響を検討してきた<sup>8)</sup>。本金型は、加熱・冷却ハイブリッド射出成形の加工現象の解析にも応用できるものと考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、まず、複雑かつ大規模な金型と加熱・冷却装置を用いることなく、簡易的に加熱・冷却ハイブリッド射出成形を実施できる新しい金型を設計・製作する。具体的には、赤外線ヒータを用いた CFRTP シートと金型キャビティ面の両方の輻射加熱、シートの圧縮成形、樹脂の射出成形の、3つの工程を射出成形機上で連続して行うことのできる金型を設計・製作する。そして、本金型により、金型の加熱条件や CFRTP シートの圧縮成形および射出成形条件などが、成形品の外観特性に及ぼす影響を実験解析する。これらの実験解析を通じて、上記成形法の加工現象を系統的に明らかにすることを目的としている。

## 3. 研究の方法

### (1) 金型構造と成形プロセス

図1に本研究で設計・製作した遠赤外線ヒータを用いた加熱・冷却ハイブリッド射出成形金型の基本構造を示す。金型分割面には、遠赤外線ヒータにより加熱される立体キャビティプレートが取り付けられたシートインサート機構が設置され、その中に CFRTP シートが挟まれたシート保持板が挿入される。図2に本研究にて提案した加熱・冷却ハイブリッド射出成形方法を示す。CFRTP シートを保持板に挟んで固定してシートインサート機構に挿入する( )。そして、金型の上方に設置された遠赤外線ヒータを、立体キャビティプレートに対向する位置まで降下させて、立体キャビティプレートとシートを同時に加熱する( )。プレートとシートが所定の温度まで上昇したら、ヒータを元の位置に上昇させる( )。そして、型締めを行う。この際、射出成形機の型締めによってシートがプレートとコアブロックの間に挟まれて圧縮変形し、型内で一次成形品が成形される( )。その後、シートとコアブロックの間に設けられたキャビティ内に樹脂を射出し、シート面に樹脂を融着させる( )。型締めにより立体キャビティプレートが低温のモールドベースに接触した瞬間から冷却が開始される。そして、冷却完了後に型を開いて、プレートとコア入れ子との隙間から、成形品がシート保持板ごと取り出される( )。最後に、シート保持板から成形品を取り外して、成形品の不要部分のトリミングを行う。図3に本成形プロセスにより成形される成形品の形状・寸法を示す。成形品は浅い箱形状となっている。成形品の表側には、桃色で示される圧縮成形された CFRTP シートが位置し、一方、裏側には、青色で示される射出成形された格子状のリブ部とリブ部を囲むように配置された四角形のフレーム部が位置している。

### (2) 実験方法

遠赤外線ヒータには、ラジアンパッドヒータ (PD3040, (株)ワイエイシイデンコー, 425mm × 325mm × 30mm) を使用した。実験に使用した射出成形機は ROBOSHOT S-2000i 50A (ファナック(株), 最大型締力 500kN) である。CFRTP シートには、アクリルを母材としたパイロフィルシート TR6110 (炭素繊維束 6K, 平織, 厚さ 0.4mm, 三菱ケミカル(株)) を使用した。また、射出成形樹脂

には、アクリル PMMA(アクリペット VH001,三菱ケミカル株)を使用した。立体キャビティプレートの温度を 50 から所定の温度まで加熱した後、射出成形機の型締め動作を利用して CFRTP シートの圧縮成形を行い、その後、一定の時間が経過してから、樹脂の射出を行い、50 まで冷却し、成形品を取り出した。圧縮成形におけるプレス力は、射出成形機の最大型締力の 500kN とした。本研究では、型締めによってシートの圧縮成形が完了してから射出を開始するまでの間の時間(以後、射出前停止時間と呼称する)を変化させて、これが成形品外観に及ぼす影響について検討を行った。また、シートの積層数が成形品に及ぼす影響を検討した。さらに、圧縮成形におけるシートの圧縮率が成形品に及ぼす影響について検討した。本研究では、立体キャビティプレートの加熱条件が成形品の的外観に及ぼす影響の検討を行うことを目的としている。そこで、クロメル・アルメルの素線熱電対である微小表面用温度センサ ST-56(理化工業株)を、図 3(2)に示すような、金型固定側に面したシート裏面の圧縮部に位置する A に貼付してシート温度を測定した。

#### 4. 研究成果

##### (1)金型加熱温度と射出前停止時間の影響

図 4 に本成形プロセスを用いて得られた成形品の外観の一例を示す。すべての成形条件において、所定の箱形の形状が成形された。図 4 の B 部を拡大撮影した結果を図 5 に、圧縮部 C を形

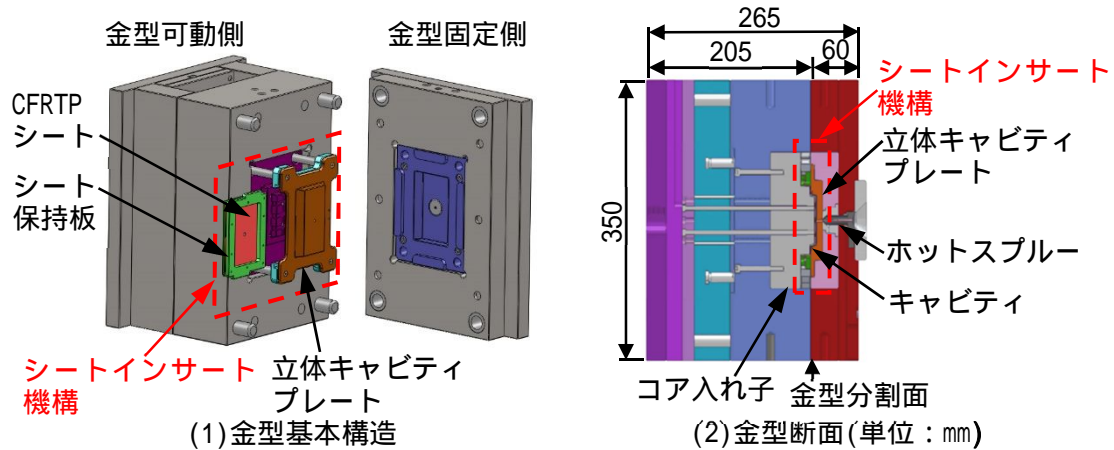


図 1 加熱・冷却ハイブリッド射出成形金型

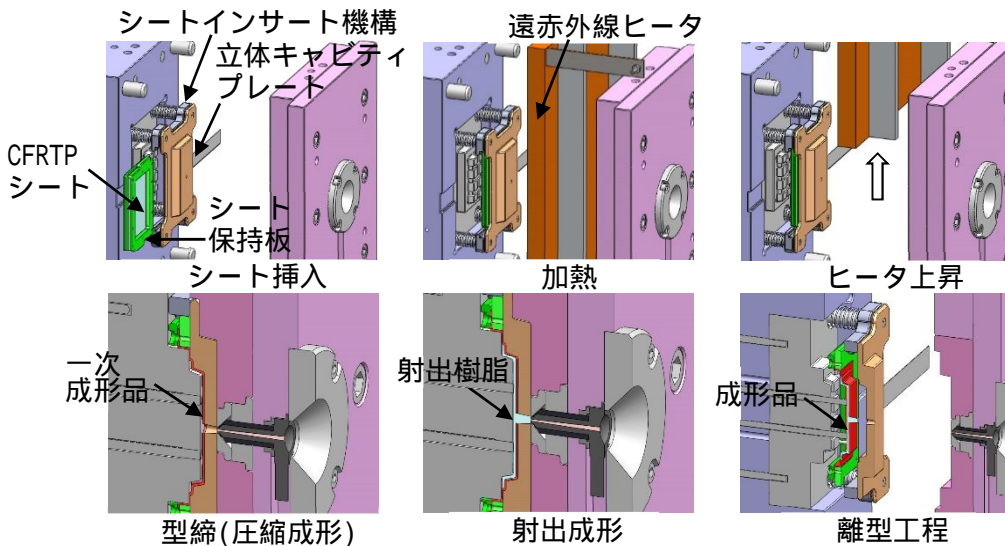


図 2 CFRTP シート加熱・冷却ハイブリッド射出成形プロセス

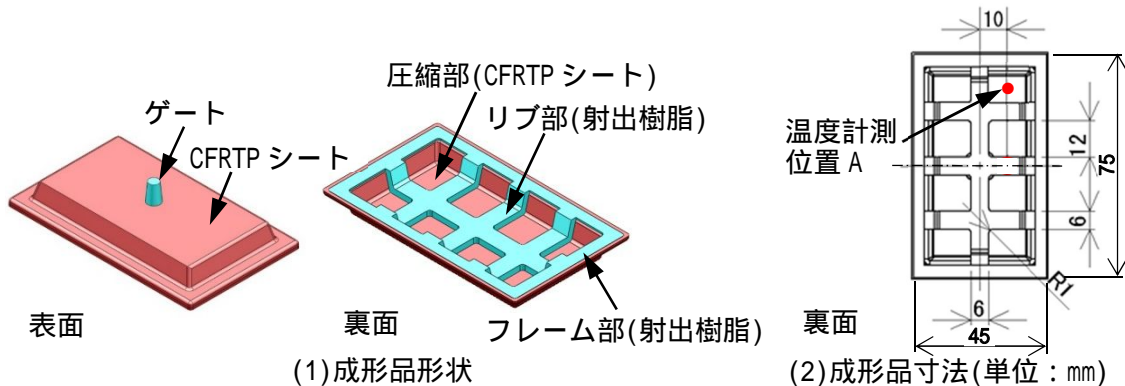


図 3 成形品の形状・寸法

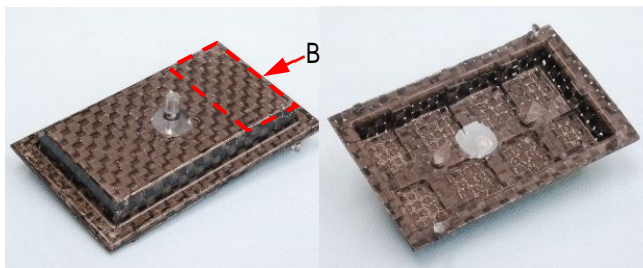
状解析レーザ顕微鏡で拡大観察した結果を図6にそれぞれ示す。(1)の射出前停止時間が0sで、180℃まで立体キャビティプレートの加熱を行った成形品では、圧縮部においてくぼみが生成され、その底部に繊維の織り目模様が浮き出したような表面欠陥が生成されている。(2)の280℃まで加熱を行った成形品では、上記表面欠陥の生成範囲が狭くなっているものの、完全には消失していない。一方、(3)の射出前停止時間15sでは、表面欠陥が消失している。このように加熱温度と射出前停止時間が成形品の外観特性に影響を及ぼすことを明らかにすることができた。

(2)シート温度の測定

シートの圧縮成形のみを行って計測された、図3(2)に示したシート裏面の圧縮部A点での温度プロファイルを図7に示す。立体キャビティプレートの加熱温度の上昇に伴い、圧縮完了時tにおける温度が上昇している。この結果より、加熱温度の上昇に伴いシート温度が上昇し、シートの母材のPMMAの粘度が低下するため、圧縮時に低粘度のPMMAがシートの表面に染み出してプレート面の表面性状を転写しやすくしているものと推察される。ただし、射出前停止時間が短い場合には、上述のように母材のPMMAの粘度が低い状態にあるため、金型内の成形品フレーム部に残留した空気がプレートとシートの間を通過して圧縮部に押し込まれ、表面欠陥が生成されるものと推察される。このように、加熱温度と射出前停止時間が、成形中のCFRTPシート温度に影響を及ぼし、その結果、表面欠陥が生成されることを明らかにすることができた。

(3)CFRTPシート積層数とシート圧縮率の影響

CFRTPシートの積層数と圧縮率を変化させて得られた成形品外観の観察結果を図8と図9にそれぞれ示す。(1)のシート1枚の圧縮率12.5%の成形品よりも、(2)の2枚の成形品の方が、圧縮部の表面欠陥が抑止されている。また、(3)の2枚の圧縮率37.5%では、圧縮部で圧縮されたシートがはみ出してリブ部に入り込み織り目模様の乱れが生じている。1枚では、保圧過程で成形品のフレーム部に残留した空気が、プレートとシートとの間を通過して圧縮部に押し込まれ、表面欠陥が生成される。2枚の場合では、金型固定側に面するシートが低温に保たれたコア入れ子に触れた瞬間に冷却固化されるために、プレート側に面したシートの方が大きな圧縮を受ける。その結果、残留空気が押し込まれずに表面欠陥が生成され難くなったものと推察される。圧縮率が37.5%の成形品では、12.5%の成形品よりも表面欠陥の生成が抑えられている。これは、圧縮量が大きいため、残留空気が圧縮部に押し込まれ難くなったためと推察される。このように、シート積層数と圧縮率が表面欠陥の生成に影響を及ぼすことを明らかにすることができた。



(1)表面 (2)裏面

図4 成形品外観(50 280 50 )

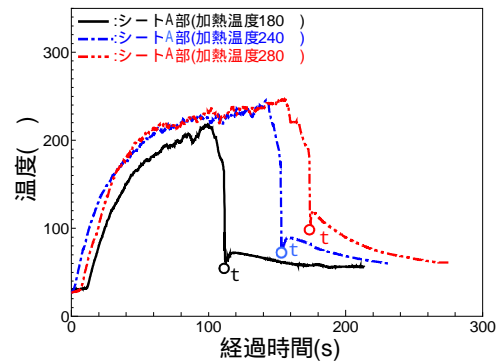
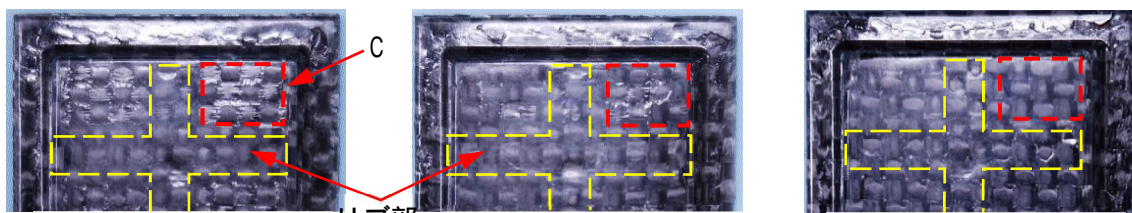
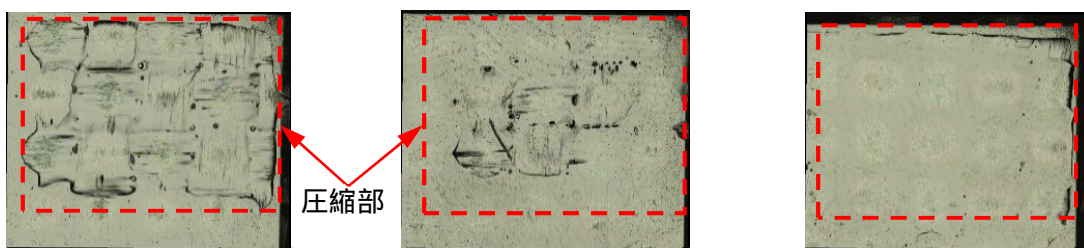


図7 CFRTPシート温度の経時変化(0s)



(1)50 180 50 ,0s (2)50 280 50 ,0s (3)50 280 50 ,15s

図5 成形品B部の観察結果(1シート,圧縮率12.5%)



(1)50 180 50 ,0s (2)50 280 50 ,0s (3)50 280 50 ,15s

図6 圧縮部Cの拡大観察結果(1シート,圧縮率12.5%)

(4) エンジニアリングプラスチックを母材とする CFRTP シートへの適用

市場では、高強度と耐熱性を有するエンジニアリングプラスチックが CFRTP シートの母材として利用されている。そこで本研究では、本成形法の適用範囲の拡大を目指して、エンジニアリングプラスチックの一つであるポリカーボネート PC を母材とする CFRTP シートの成形への適用の検討を行った。PMMA よりも融点の高い PC に適用するために近赤外線ヒータを新たに導入した。2種類のハロゲンランプヒータ(有フィンテック東京)を使用し、図 10 に示すように近赤外線ヒータを立体キャビティプレートに対向する位置と、その両側面に斜め方向に配置した。ヒータ b からの放射熱により、シートの露出している部分の温度が上がり過ぎないように調節するために、シートの前にアルミ製の遮蔽板を設置した。近赤外線ヒータでは、遠赤外線ヒータよりも CFRTP シートが昇温しにくいものの、立体キャビティプレートの昇温時間が短くなることなどの昇温特性を明らかにした。そして、本加熱方法を用いて成形を行い、図 11 に示すように射出前停止時間 22.5 秒において、圧縮部とリブ部の外観がともに良好な成形品が得られることを明らかにした。特に、射出前停止時間が成形品外観に大きな影響を及ぼし、圧縮部の外観とリブ部の外観がトレードオフの関係となることを明らかにすることができた。

(5) 結言

加熱・冷却ハイブリッド射出成形現象を大学研究室において簡易的に実験解析するために、遠・近赤外線ヒータを用いて、CFRTP シートと金型とを同時に加熱できる加熱・冷却ハイブリッド射出成形金型と成形方法を提案した。そして本方法を用いて、これまで研究がなされてこなかった CFRTP シートのハイブリッド射出成形品の表面欠陥の生成原因を明らかにした。

引用文献

酒谷芳秋, 山口泰弘, 日本複合材料学会誌, 第 2 巻, 第 4 号, 1976, 152-160  
 KraussMaffee ホームページ, [https://www.tp-composites.com/wp-content/uploads/sites/3/2016/06/IMM\\_BR\\_FiberForm\\_en.pdf](https://www.tp-composites.com/wp-content/uploads/sites/3/2016/06/IMM_BR_FiberForm_en.pdf)  
 浅沼伸行, 成形加工, 第 27 巻, 第 3 号, 2015, 89-93  
 大野秋夫, 安江 昭, 井上茂樹, 西田正三, 羽生芳史, 日本製鋼所技報, 第 66 巻, 2015, 129-134  
 富岡正雄, 石川 健, 井上 玲, 田中達也, 成形加工, 第 30 巻, 第 4 号, 2018, 170-177  
 藪谷祐希, 森澤 論, 赤田英里, 三重県工業研究所研究報告, 第 42 号, 2018, 44-49  
 海老沢篤志, 成形加工, 第 11 巻, 第 5 号, 1999, 397-400  
 村田泰彦, 河口大介, 浅野 智, 石田和也, 加藤嗣未, 竹内琢馬: 精密工学会誌, 第 83 巻, 第 10 号, 2017, 962-966

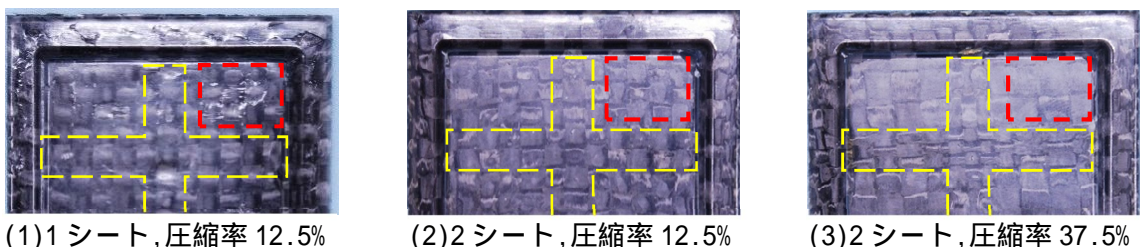


図 8 成形品 B 部の観察結果(50 280 50 ,0s)

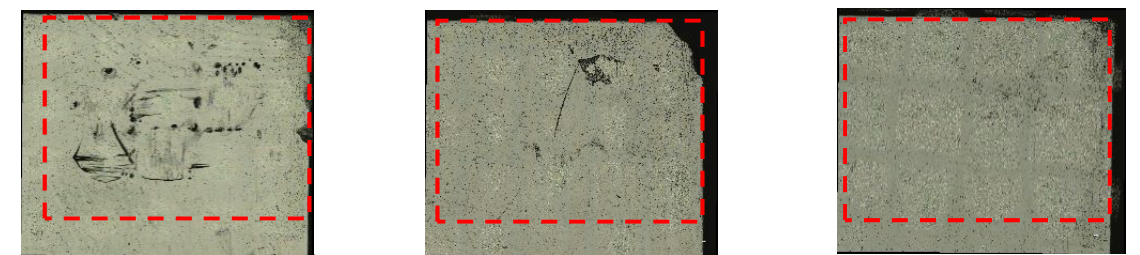


図 9 圧縮部 C の拡大観察結果(50 280 50 ,0s)

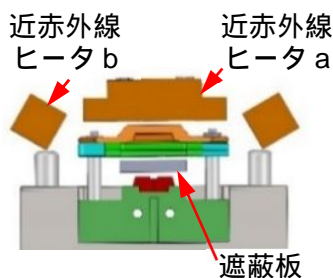


図 10 近赤外線ヒータを用いた加熱方法



図 11 ポリカーボネートを母材とする CFRTP シート成形品(22.5s)

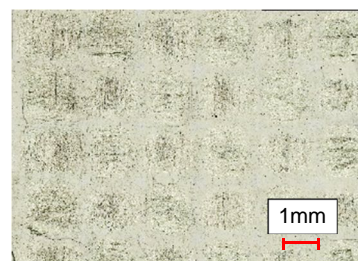


図 12 圧縮部 D 部の拡大観察

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 奥山卓, 本田和希, 村田泰彦
2. 発表標題 CFRTPシートの加熱・冷却ハイブリッド射出成形法の検討
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥山卓, 工藤友成, 清野博良, 村田泰彦
2. 発表標題 赤外線ヒータを用いたCFRTPシートの加熱・冷却ハイブリッド射出成形法の開発(第3報) - 近赤外線ヒータの適用 -
3. 学会等名 精密工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村田泰彦, 奥山卓
2. 発表標題 CFRTPシートの加熱・冷却ハイブリッド射出成形現象の検討
3. 学会等名 型技術協会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥山卓, 工藤友成, 清野博良, 谷村侑彦, 野口宏昌, 村田泰彦
2. 発表標題 CFRTPシートの加熱・冷却ハイブリッド射出成形法の検討 - 近赤外線ヒータによる加熱方法の検討 -
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------