

Press forming for carbon fiber reinforced thermoplastics

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/48054

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



学位論文要旨

熱可塑性 CFRP のプレス成形加工法
Press forming for carbon fiber
reinforced thermoplastics

金沢大学大学院自然科学研究科
機械科学専攻

氏名 : 立野 大地

The press forming process for carbon fiber reinforced thermoplastic (CFRTP) sheets has been established. Forming phenomena in press forming, and the relationship between forming conditions and property of the part after forming has been elucidated. The deformation behavior of plain woven CFRTP sheet varies according to the fiber direction against the die shape. With the position control of the mechanical servo press, the press load decreases as the temperature of CFRTP sheet in the die decreases. With the load control which keeps the press load during forming increases the bending strength of the part after forming compared with the part formed by position control. The cooling rate of CFRTP sheet under constant pressure influences the bending strength of the part. By solidifying the resin in 20 s under 5MPa the bending strength after forming was 733 MPa, while solidifying the resin in 4 s under the same pressure provides 536 MPa. Using the servo die cushion of the press machine, the side die force to the vertical sides of the part was applied in press forming. The heating-transferring equipment reduces the cooling of the heated sheet during transferring. Using the press machine, trimming and joining of the part after forming were also realized.

1. 研究の目的、課題および方法

本研究は、炭素繊維強化熱可塑性樹脂(以下、熱可塑性 CFRP と呼ぶ)のプレス成形、切断、接合の一連の加工プロセスを実現するとともに、プレス成形時の成形現象を明らかにすることを目的とする。図 1 に本研究で扱うプレス成形加工プロセスを示す。

熱可塑性 CFRP は、加熱溶融すれば柔らかくなり変形加工が可能で、その後冷却すれば固化して成形品を得ることができる。この性質を利用し、短時間の成形サイクルが可能である。プレス成形法は熱可塑性 CFRP を用いた短時間成形法の一つであるが、この技術における材料の設計方法、金型の設計方法、プレス成形条件と成形品の特性との関係など、実用化にあたって克服すべき課題が多くある。熱可塑性 CFRP は、軽くて高強度な特性を活用して、将来的に量産自動車等の部品に適用されることが期待されている。したがって、今後需要が見込まれる熱可塑性 CFRP の成形加工法の知見、ノウハウを蓄積することが必要である。自動車等の量産において求められる 1 分サイクルでの成形を実現するための知見を得ることが本研究の目標である。

本研究では、炭素繊維織物に熱可塑性樹脂を含浸した熱可塑性 CFRP を用いた成形、切断および接合を、サーボプレスを使って実践し、各プロセスにおける成形現象、成形条件と成形品の特性との関係など、関連する要素間の相互関係を解明する。そのうえで短時間・高品質を満足するために生産設備や金型などに求められる機能および課題を明らかにする。

図 2 はプレス成形に関わる要素を分析したものである。プレス成形では、成形前の繊維が成形中にどのように変形し成形品形状に対して繊維がどのように配向するか、金型温度および圧力が樹脂や繊維の流動にどのように影響するか、成形条件と成形品特性とがどの

ような関係にあるかなどを明らかにし、プレス成形に求められる金型、プレス機および周辺機器の機能ならびに適切な成形条件を明らかにする。プレス成形後の切断では板金で用いられるせん断を扱い、熱可塑性 CFRP をせん断でトリミングすることの妥当性、せん断メカニズム、せん断金型に求められる機能などを明らかにする。接合ではプレス成形後の部材を局所的に加熱加圧する溶着接合を扱い、溶着接合で得られる接合強度、プレス機を用いて接合する方法および金型構造を解明する。

本論文ではこれらの研究成果と明らかになった課題をまとめ、本研究の展望について述べる。

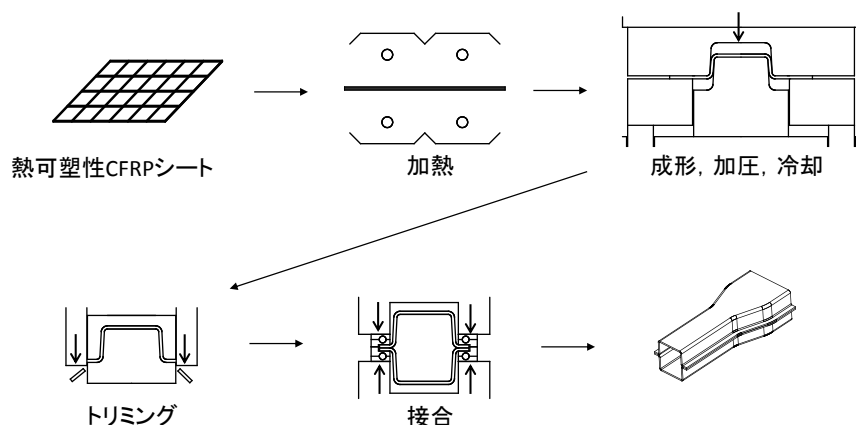


図 1 本研究で扱うプレス成形加工プロセス

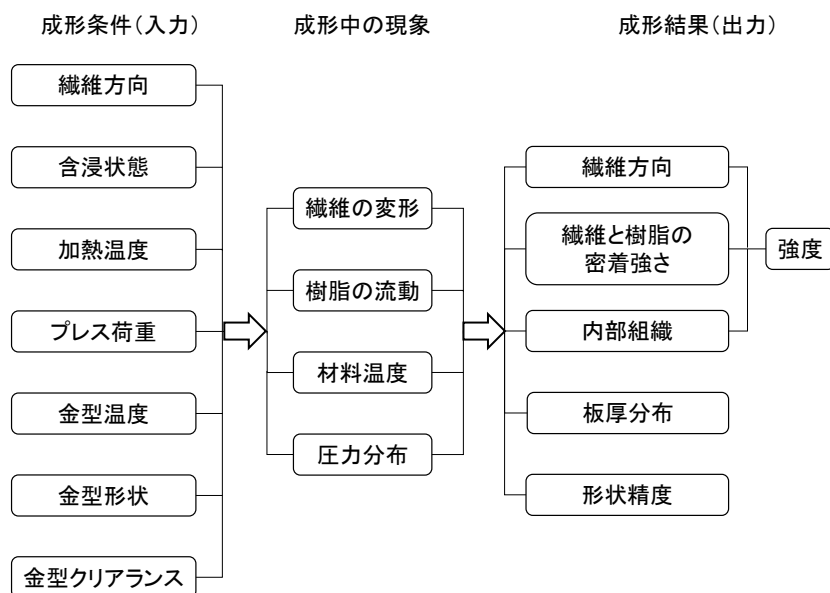
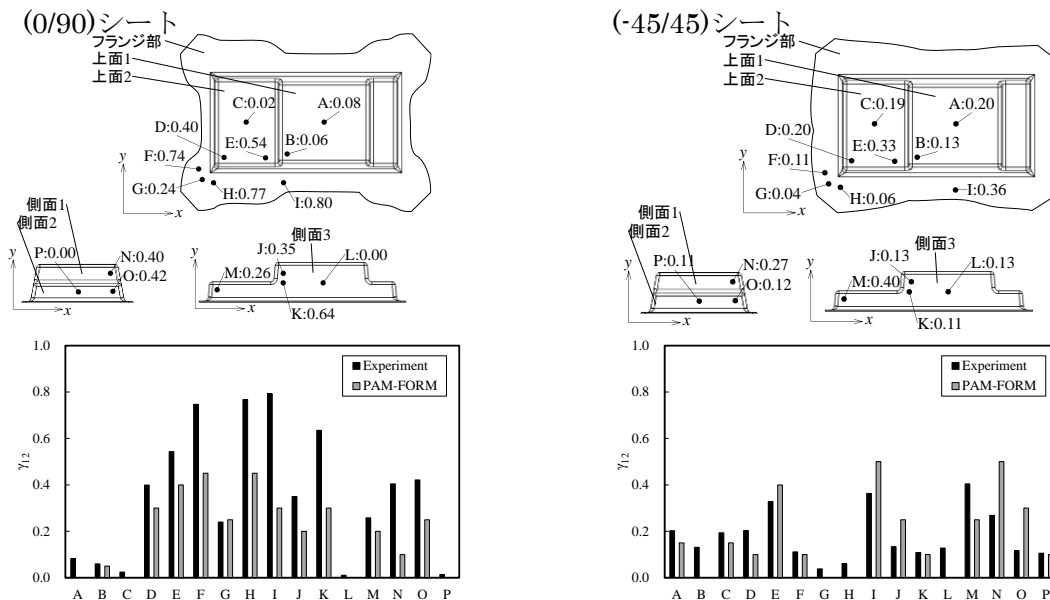
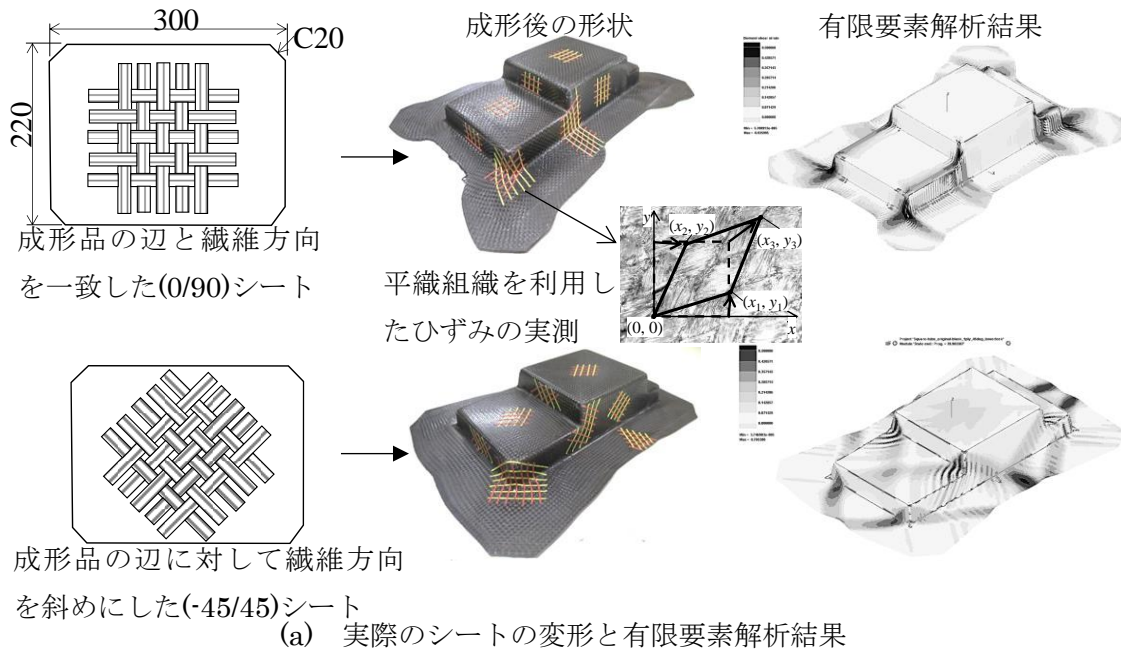


図 2 プレス成形に関わる要素の関連図

2. プレス成形時の繊維の変形挙動

炭素繊維の平織に熱可塑性樹脂(PA6)を含浸したシートを用いてプレス成形し、平織繊維の変形挙動を実験的に調べた。炭素繊維は繊維方向に伸びないため、図 3(a)に示すように、

成形形状に対する繊維方向によってシートの変形が異なることがわかった。PAM-FORM を用いた有限要素解析において、シートの引張弾性係数に対してせん断弾性係数を十分小さくすることで平織シートの変形を再現できることがわかった。平織組織を利用したひずみの実測法を考案し、図 3(b)に示すように、成形品のひずみ分布を実験的に測定し、有限要素解析で得たひずみ分布との比較検討を行った。平織シートの変形挙動を実験的に調べることで、平織シートの変形挙動についての知見を得た。



(b) 実測した主せん断ひずみ分布(上)と解析との比較(下)

図 3 繊維の変形挙動についての研究成果

3. プレス成形における圧力、温度と強度

3.1 プレス荷重、シート温度および金型界面接触状態の解明

熱可塑性 CFRP シートのプレス成形中の基本的な現象として、プレス荷重およびシート温度変化を調べた。さらにプレス成形中のシートと金型表面との接触状態を、金型内部に挿入した内視鏡によって可視化し、プレス荷重およびシート温度との関係を調べた。

図 4 に示すように、熱可塑性 CFRP シートのプレス荷重波形は、変形抵抗がなく、材料が金型内に充満した時点で荷重が急増すること、最大荷重のあと荷重が低下することがわかった。荷重の低下は、シート温度の低下による樹脂の収縮によるものであり、冷却とともに樹脂が金型表面から離れることが内視鏡観察から明らかになった。

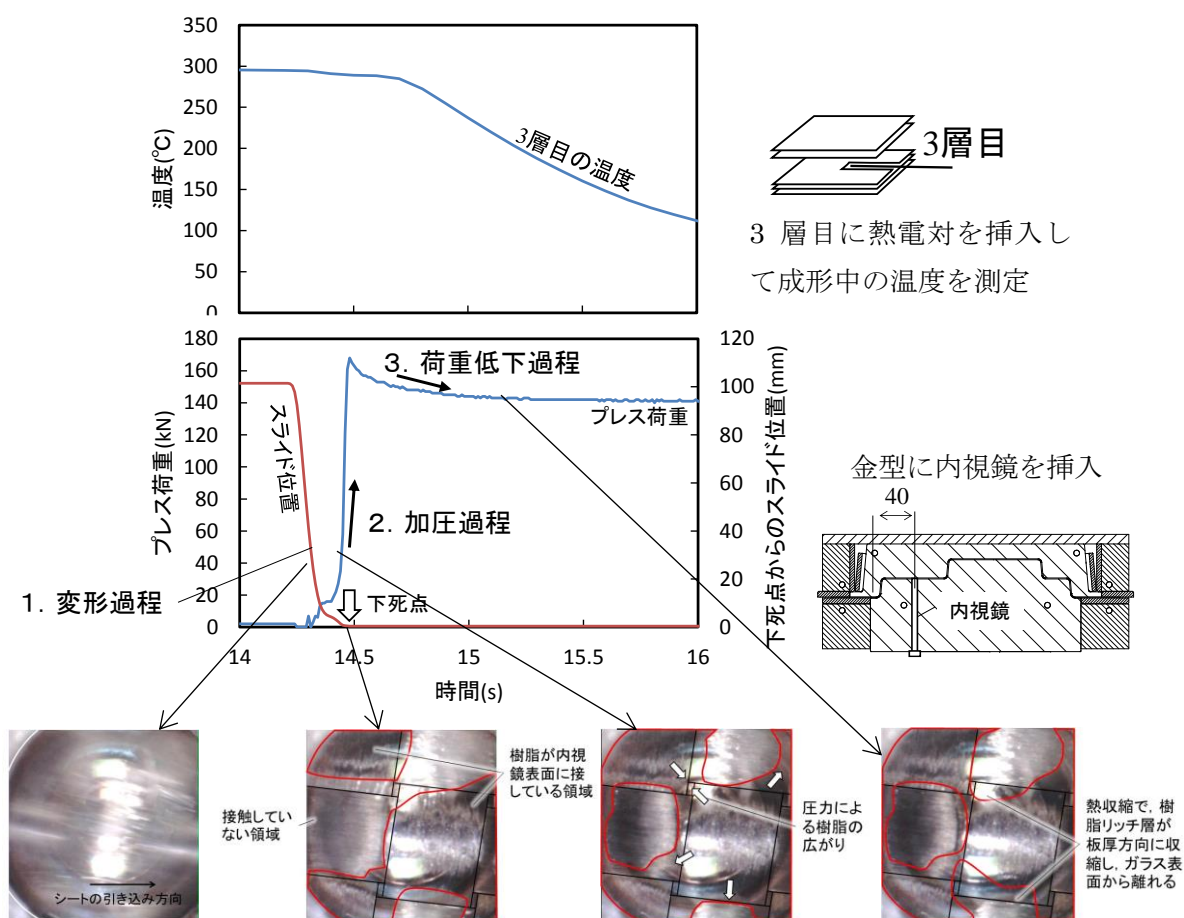


図 4 シート内部温度変化とプレス成形荷重波形およびシートと金型界面との接触状態

3.2 荷重制御の効果

プレス成形中の樹脂の冷却過程での荷重低下を補うプログラムをサーボプレスに導入し、プレス荷重条件と成形後の強度との関係を調べた。通常のメカニカルサーボプレスは位置制御で動作するためスライドは下死点より下に動けず、熱収縮にともなって荷重が低下する。下死点より少し上でスライドを止めて荷重に応じて少しずつスライドを下げる荷重制御モーションで成形することで、成形後の強度を向上することができた。成形中の荷重を一定に保つことで繊維と樹脂との密着度が高まったと考えられる。

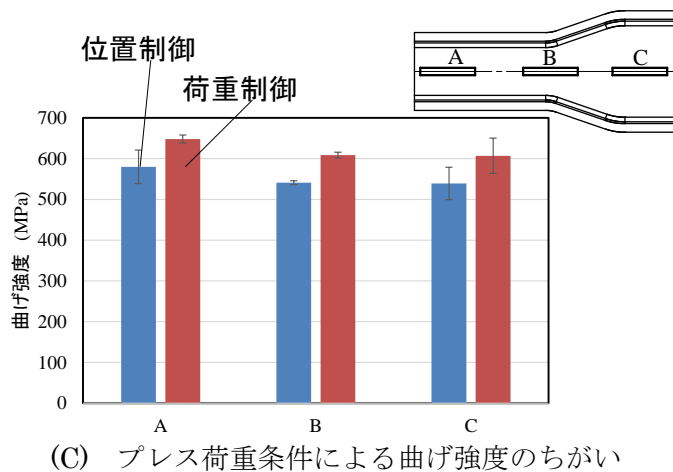
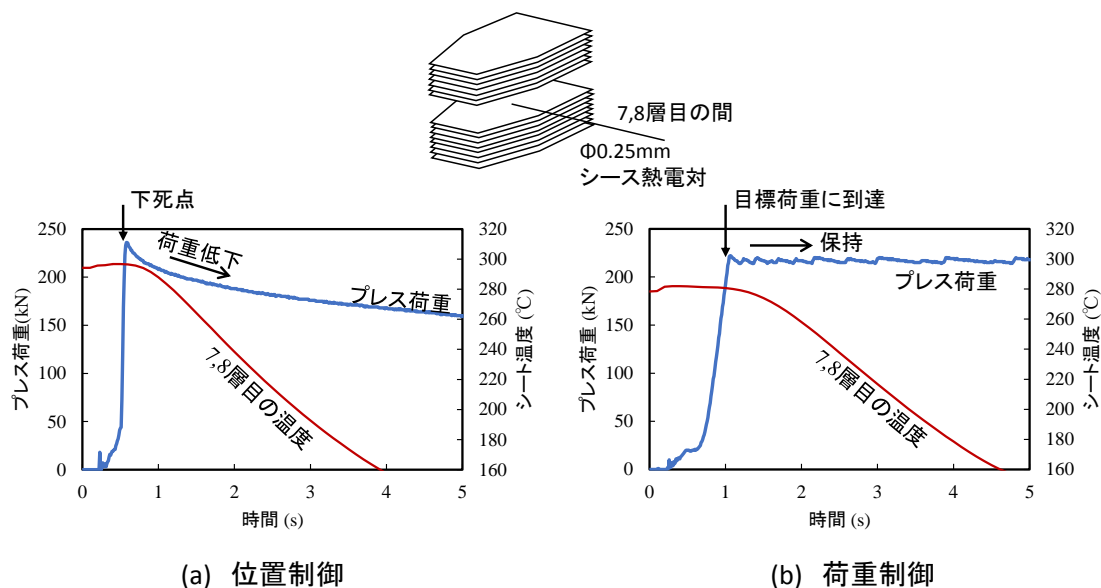


図5 プレス荷重条件によるプレス荷重波形および曲げ強度の比較

3.3 加圧中のシートの冷却速度の効果

プレス成形時の荷重を保持した状態でのシートの冷却速度と成形後の強度との関係調べた。変形の影響を除いた平板の成形において、金型の温度によってシートの冷却速度を変えた。冷却速度が遅いほど曲げ強度が高くなることがわかった。シートの冷却速度を $-4.4^{\circ}\text{C}/\text{s}$ とし、熔融した樹脂を 20 秒ほどかけて固化させ、その間 5MPa を保持することで、1 分以内の成形(25 秒の冷却)で高い強度を得られることが明らかになった。絞り成形などより複雑な形状においても、このような冷却条件を実現する金型温調が求められる。

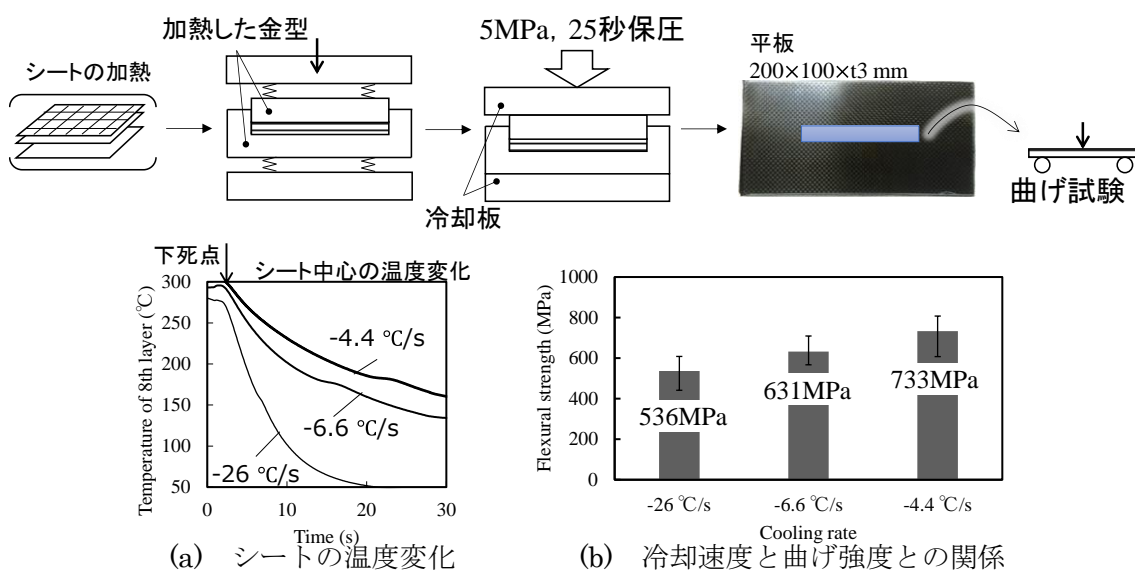
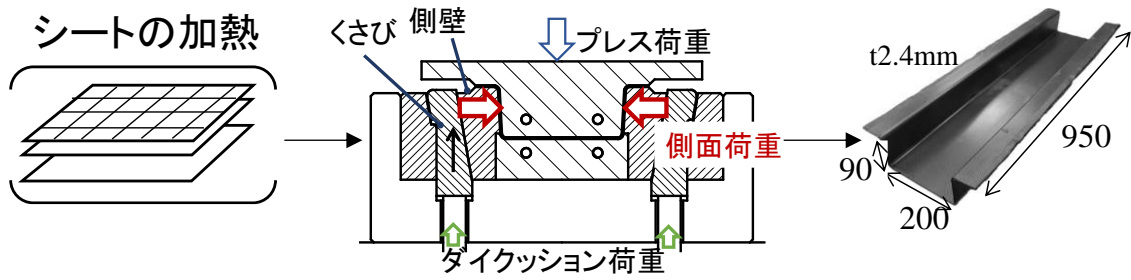


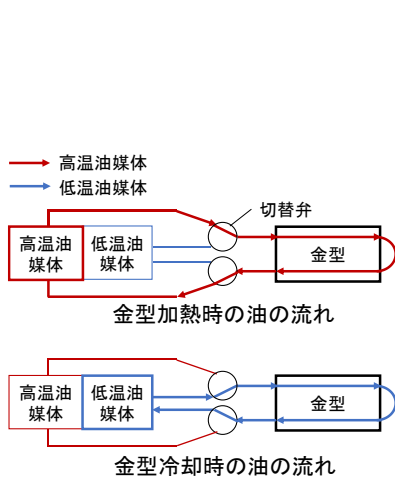
図 6 シートの冷却速度と曲げ強度との関係

3.4 側面加圧およびヒートアンドクール成形の効果

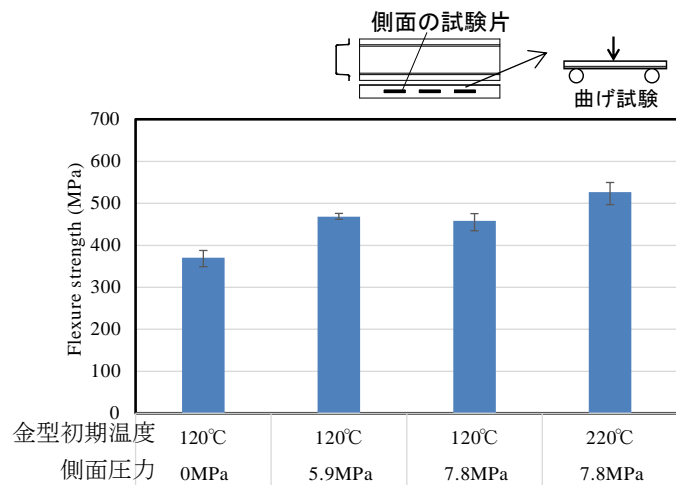
プレス荷重とは独立した側面加圧が可能な金型を製作し、油媒体式のヒートアンドクール成形を適用し、成形条件と成形後の強度および形状精度との関係を調べた。熱可塑性 CFRP のプレス成形では成形品の全面に加圧することが成形後の強度にとって重要である。そこで、サーボプレスのサーボダイクッション荷重を利用して、外部的な加圧装置を使わず、図 7(a)に示すようにプレス荷重とは独立して側面に荷重を与えることができる金型を製作した。側面加圧をすることで側面のポイドを減らし、曲げ強度を向上することができた。高温の油と低温の油を切り替えて金型の温度を制御するヒートアンドクールシステムを用い、成形前の金型初期温度を 220°C に加熱し、加圧中に低温油により急速冷却することで、金型温度が 120°C 一定の条件に対して成形後の強度を向上させることができた。成形後の曲げ部の角度は、ヒートアンドクール成形をすることで、スプリングイン量が大きくなることが明らかになった。ヒートアンドクール成形は強度の向上に有効であるが、金型の熱容量が大きい場合は加熱冷却に時間がかかる。熱容量の小さい金型設計とし、金型の表面付近に油媒体を流す構造などが温調時間の短縮方法として考えられる。



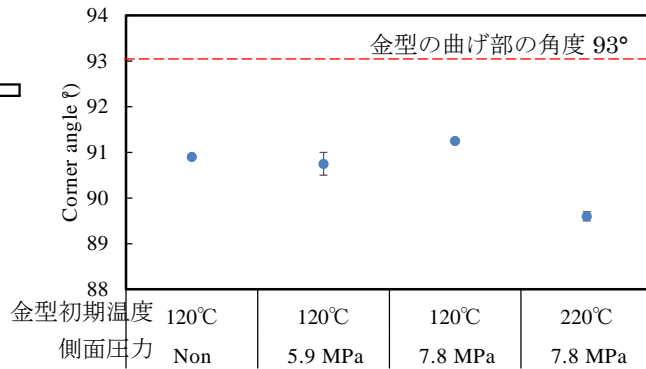
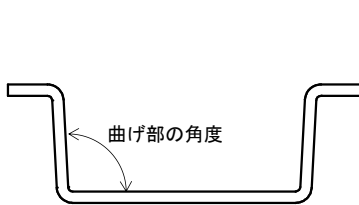
(a) サーボダイクッションを活用した側面加圧金型による成



(b) ヒートアンドクールシステムによる金型温調



(c) 成形条件による側面の曲げ強度のちがい



(d) 成形条件による曲げ部の角度のちがい

図7 側面加圧条件およびヒートアンドクール条件による曲げ強度および曲げ部の角度のちがい

4. 加熱搬送装置

プレス成形前の、シートの加熱と搬送を一体化した加熱搬送装置(図 8)を開発した。炭素繊維は熱伝導率が高いため加熱したシートの冷却が早い。そこで、開いた金型の中でシートの加熱と金型への設置を行うことで、搬送距離を短くすることを考えた。従来の輻射式の炉は熱源の体積とシートと熱源の距離の必要性から、金型までの搬送距離が長くなる問題があった。ヒータパネルを後退させることでヒータパネルを包むベルトが加熱したシートからはがれるため、シートとベルトが相対的に滑らずに分離する。加熱搬送装置を用いることで、搬送距離と搬送時間が短くなり、シートの冷却を防ぐことができた。

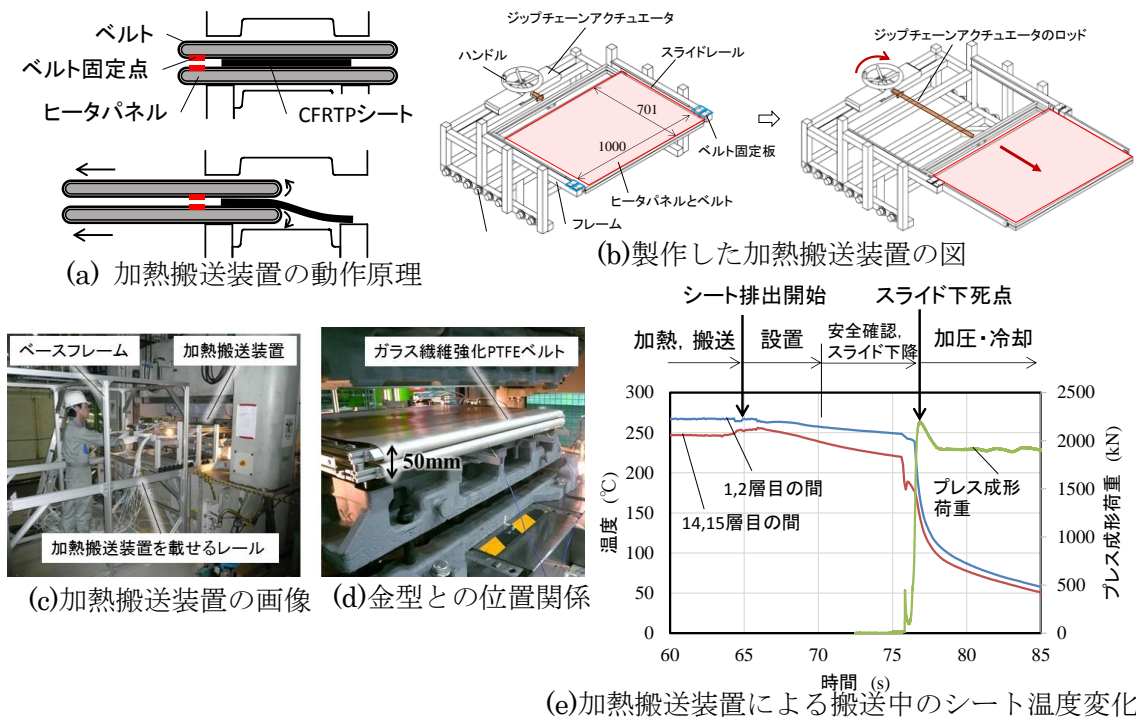


図 8 加熱搬送装置の概略

5. せん断および接合

プレス成形後のトリミング方法としてせん断を検討した。焼き入れ処理した SKD11 製の刃を用いて、図 9 に示すように、板厚 3mm の熱可塑性 CFRP をトリミングすることができた。トリミングにかかる時間は数秒程度で、せん断は短時間成形に適した方法である。切り口形状は、せん断面と破断面を持つ、Z 字型であることがわかった。

成形品どうしの接合方法として、溶着接合を検討した。短冊状の熱可塑性 CFRP シートを重ね合わせて熱と圧力を与えて図 10(a)のように接合し、引張せん断強度が母材樹脂の強度と同等の 50MPa とすることができた。さらに、プレス成形したビームのフランジ部を突き合わせて、サーボプレスを用いて図 10(b)のように閉断面ビームを製作することができた。



図9 せん断によるトリミング

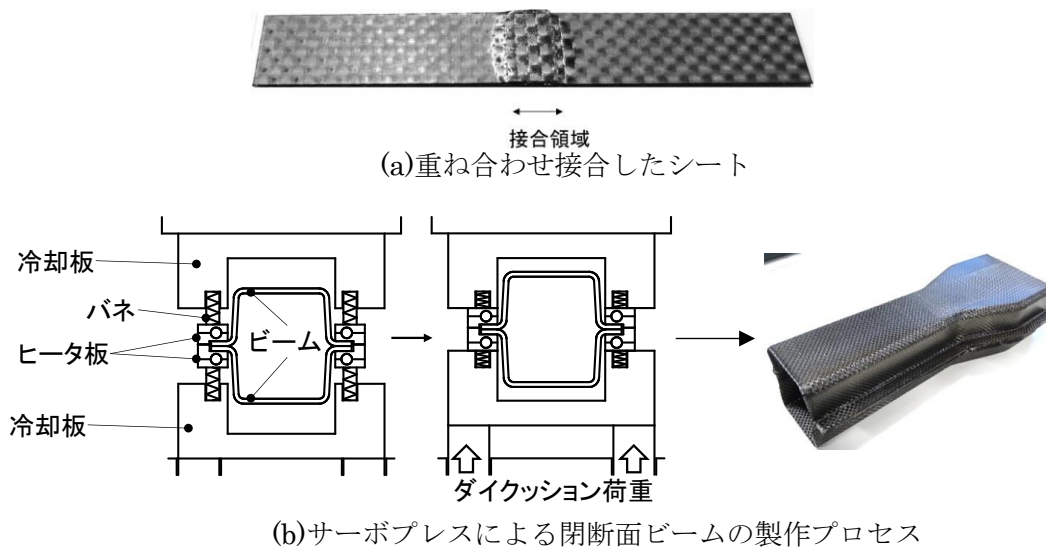


図10 熱可塑性 CFRP の接合方法の検討

6. 結言

本研究は、連続繊維熱可塑性 CFRP を用いたプレス成形を实践し、プレス成形における成形現象、成形条件と成形品の特性との関係など、関連する要素間の相互関係を明らかにした。そのうえで短時間・高品質を満足するために加熱搬送装置や金型などに求められる機能を考察し、プレス成形に適した加熱搬送装置を開発した。また、せん断によるトリミングと溶着接合法を实践し、プレスを用いた一連の成形加工プロセスを實現した。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

熱可塑性 CFRP のプレス成形加工法

2. 論文提出者 (1) 所属 機械科学専攻

(2) 氏名 たつの だいち
立野 大地

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該論文に対し、平成29年1月31日に第1回審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連論文について詳細に検討した。平成29年2月3日における口頭発表後、第2回審査委員会を開催し、慎重に審議した結果、以下のように判定した。

本論文は、熱可塑性 CFRP シートを用いたプレス成形加工法の確立をめざし、プレス成形における繊維の変形やひずみ、成形中の温度・圧力条件と成形後の機械的強度との関係などを明らかにしたものである。

特に連続繊維織物にナイロン樹脂を含浸させたシートを用いたプレス成形を取り上げ、金型形状と繊維方向との関係から生じる繊維の変形とひずみを計測して知見を得るとともに、ひずみ解析の妥当性を確認した。プレス成形において熔融した樹脂が固化するまでの時間と付加圧力との関係が成形後の強度に及ぼす影響について明らかにした。さらにプレス成形における金型の設計や加圧方法についての知見も見出している。一方、プレス成形に適したシートの加熱搬送方法を考察し、新しい加熱搬送装置を開発している。成形後の切断や接合についても、プレスを適用し、閉断面ビームの作成と強度評価を行っている。これらの知見と技術は、熱可塑性 CFRP のプレス成形による今後の短時間生産に大いに有用なものであり、工学的にも工業的にも価値が高い。

以上により、本論文は、博士（工学）の学位に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判定（いずれかに○印） 合格・不合格

(2) 授与学位 博士（工学）