

大気圧下でホットプレス成形した炭素繊維強化熱可塑性プラスチック CFRTP

積層板の機械的性質に及ぼすマイクロ波照射の影響

水野衛¹, 須山晶平², 細井柁宏³, 施建¹

¹ 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科

² 元秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科 (現 (株) 牧野フライス製作所)

³ 秋田県立大学大学院システム科学技術研究科機械知能システム学専攻

著者らは先行研究で、炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (CFRTP) 積層板を大気圧下と真空下でホットプレス成形し、それぞれの曲げ破壊応力と曲げ弾性率を測定し比較した。また、ホットプレス成形した CFRTP 積層板にマイクロ波を照射し、曲げ破壊応力に及ぼす効果を検討した。その結果、大気圧下のホットプレスで成形し人工欠陥を挿入した CFRTP 積層板の曲げ破壊応力が、マイクロ波照射によって増大することを確認した。マイクロ波照射の目的は、成形条件の悪い大気圧下でホットプレス成形しても、マイクロ波照射により CFRTP 積層板の材料特性を改善し、真空下でホットプレス成形した積層板と同等かそれ以上の材料特性を得ることにある。そこで本研究では、大気圧下でホットプレス成形した CFRTP 積層板に条件の異なるマイクロ波を照射し、曲げ弾性率と曲げ破壊応力、曲げ破壊ひずみに及ぼす影響を検討した。その結果、曲げ弾性率を向上させる最適なマイクロ波の照射条件があることを明らかにした。また、試験片の断面を光学顕微鏡で観察し、マイクロ波照射が CFRTP 積層板の内部構造に影響を及ぼすことを確認した。

キーワード: CFRTP, マイクロ波, ホットプレス成形, 曲げ弾性率, 曲げ破壊応力, 断面観察

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、軽量で成形性の良いプラスチックを高強度の炭素繊維で強化した複合材料であり、比強度や比剛性が高いなどの特徴を持つ。CFRP は、身近なスポーツ用品から航空機まで幅広く使用されている。あらかじめ繊維に樹脂を含浸したシート状のプリプレグを積層して積層材料を成形する場合、真空に引いて加熱するなど、シート間の初期欠陥をなくすために加圧と加熱が必要である。母材の樹脂に熱硬化性プラスチックを用いたプリプレグの場合、硬化が進まないよう冷凍保管が必要であり、使用できる期間にも制限がある。

一方、樹脂に熱可塑性プラスチックを用いた場合、保管上の制約はなく、加熱・冷却により軟化・固化が繰り返し行えるため、製造、修理、リサイクルが

容易に行える利点がある。このような、炭素繊維強化熱可塑性プラスチックは CFRTP と呼ばれ、自動車の構造材料として期待され、実用化が進められている (西, 鎗木, 黒瀬, 平島, 及び倉敷, 2014)。

著者らは先行研究で CFRTP 積層板の成形時間を短縮し成形コストを削減する目的から、大気圧下でホットプレス成形を行い、マイクロ波照射による材料特性の改善を検討した。また、成形時の内部欠陥や使用時の内部損傷を非破壊検査する方法として、マイクロ波による選択的加熱を利用し赤外線サーモグラフィで温度分布の変化を測定する非破壊検査法の可能性を検討した。その結果、人工欠陥を挿入し大気圧下でホットプレス成形した CFRTP 積層板の曲げ破壊応力が、マイクロ波照射により上昇するこ

とを確認した(水野, 小林, 細井, 及び施, 2015).
 なお, CFRP に対するマイクロ波照射の効果は, 他
 の研究者らによっても報告されている(Benitez et al.,
 2007 ; Nguyen et al., 2012).

そこで本研究では, 大気圧下でホットプレス成形
 した CFRTP 積層板にマイクロ波を照射し, 3 点曲げ
 試験を行う. マイクロ波照射の条件を変えながら曲
 げ弾性率, 曲げ破壊応力, 曲げ破壊ひずみを測定し,
 これらの機械的性質に及ぼすマイクロ波照射の影響
 を検討する. また, 試験片断面を光学顕微鏡で観察
 し, マイクロ波照射が CFRTP 積層板の内部構造に及
 ぼす影響を考察する.

実験方法

先行研究(水野, 小林, 細井, 及び施, 2015)と
 同様に, CFRTP のプリプレグとして三菱レイオン製
 パイロフィルシート TR3120 を使用した. このシー
 トを 100×100 mm に切断し, 6 層に積層して大気圧
 下でホットプレス成形により積層板を作製した. ホ
 ットプレスにはアズワン製小型熱プレス機
 (AH-2003) を使用した.

大気圧下でのホットプレス成形条件は, 成形した
 積層板の断面に初期欠陥が存在せず, 外観にもゆが
 みや膨らみが存在しない綺麗な平板が得られるよう
 予備実験により決定した. 今回行った成形条件は,
 加熱温度 180 °C, 加圧 7.9 MPa, 成形時間 210 s であ
 る. なお, 成形温度 150 , 200 °C でも積層板を作製
 し, マイクロ波照射の影響を検討した.

成形後の積層板はダイヤモンドカッター
 (RC-150DM) を装着したリトク製水冷式卓上型切
 断機 (RC-150) で幅 15 mm に切断し, 100×15 mm
 の帯状試験片を作製して, 3 点曲げ試験を行った. 3
 点曲げ試験には支点間距離 30 mm の治具を用い, 曲
 げ弾性率と曲げ破壊応力, 曲げ破壊ひずみの測定を
 行った. 曲げ弾性係数は, 曲げ応力-曲げひずみ線
 図の除荷時の傾きより評価した. また, CFRTP 積層
 板試験片の破壊は, 曲げ応力-曲げひずみ線図で最
 初に応力が減少した点を破壊と判定し, その点の曲
 げ破壊応力と曲げ破壊ひずみを評価した. 3 点曲げ
 試験を行うときのクロスヘッド速度は JIS K 7074 に

準拠し, $V=0.78$ mm/min とした.

本研究では, 大気圧下でホットプレス成形した
 CFRTP 積層板に出力の異なるマイクロ波を照射し,
 その影響を検討した. 前述の 100×15 mm の帯状試
 験片に対し市販の業務用電子レンジ RE-7500 (シャ
 ープ製) を用いてマイクロ波を照射した. マイクロ
 波の出力は, 0 (未照射), 150 , 250 , 500 W とし,
 照射時間は予備実験の結果から 120 s で固定した.

実験結果

図 1 に大気圧下でホットプレス成形した CFRTP
 積層板の曲げ弾性率に及ぼすマイクロ波出力の影響
 を示す. マイクロ波を照射することにより曲げ弾性
 率は未照射時 (0 W) より向上するが, その傾向は
 250 W 時がピークで, 500 W 時はピーク時より減少
 する. また, 曲げ弾性率のばらつきは 0 W と 250 W
 時が小さく, 150 W と 500 W 時はばらつきが大きい.
 曲げ弾性率のばらつきを考えると, 500 W 照射時は
 未照射時よりも曲げ弾性率が低下する場合もある.
 これらの結果より, 適切な条件でのマイクロ波照射
 は, 大気圧下でホットプレス成形することにより発
 生した初期欠陥を修復する効果があると推察される.
 その一方で, マイクロ波の過剰照射は, マイクロ波
 加熱による繊維と母材の熱膨張率差に起因した熱応
 力により, 曲げ弾性率を低下させる内部損傷を生じ
 させると考えられる.

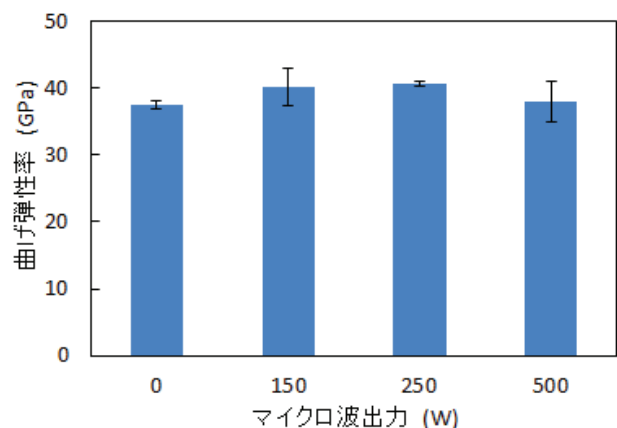


図1 CFRTP 積層板の3点曲げ弾性率に及ぼすマイク
 ロ波出力の影響

図 2, 3 に CFRTP 積層板の 3 点曲げ破壊応力ならびに破壊ひずみに及ぼすマイクロ波出力の影響をそれぞれ示す。

図 2 に示す曲げ破壊応力は、250 W 照射時までほぼ変化が無いが、500 W 照射時に若干破壊応力が上昇している。

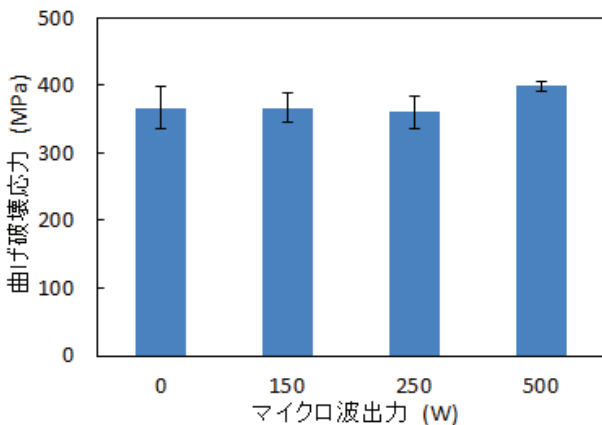


図 2 CFRTP 積層板の 3 点曲げ破壊応力に及ぼすマイクロ波出力の影響

一方、図 3 に示す曲げ破壊ひずみは、未照射ならびに 250 W 照射時のばらつきが大きいものの、定性的にはマイクロ波出力が大きくなるにしたがって曲げ破壊ひずみも大きくなっている。

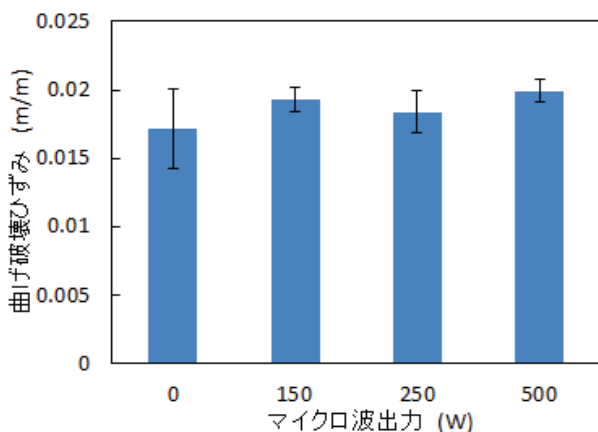


図 3 CFRTP 積層板の 3 点曲げ破壊ひずみに及ぼすマイクロ波出力の影響

図 4 に 3 点曲げ破壊時の带状試験片の様子を示す。本研究で用いたパイロフィルシートは炭素繊維のクロスにアクリル樹脂を含浸させたプリプレグであり、

それを積層板に成形した場合、3 点曲げに対しては炭素繊維が荷重を支えている。大気圧下でホットプレス成形した CFRTP 積層板へのマイクロ波照射の効果は、樹脂に存在する成形時の初期欠陥の修復あるいは熱応力による内部損傷の生成と考えられるため、曲げ破壊応力に対してはマイクロ波照射が系統的な影響を与えないと考えられる。一方、曲げ破壊ひずみに対しては、内部欠陥あるいは内部損傷が多いほど曲げひずみは大きくなると考えられる。



図 4 CFRTP 積層板带状試験片の 3 点曲げ破壊

図 5 は大気圧下でのホットプレス成形温度が異なる CFRTP 積層板の带状試験片に、出力 250 W、照射時間 120 s でマイクロ波を照射したときの、曲げ弾性率の変化を示す。いずれの場合も、加圧 (7.9 MPa)、成形時間 (210 s) はすべて同じ条件でホットプレス成形している。いずれの成形温度の試験片もマイクロ波を照射することにより曲げ弾性率が上昇している。成形温度が 150 °C のとき、成形温度が低いために成形時の初期欠陥が多数発生していると考えられ、曲げ弾性率のばらつきが大きい。マイクロ波が未照射の場合、成形温度が 200 °C のときに曲げ弾性率が一番大きいが、マイクロ波を照射することにより、成形温度が 180 °C と 200 °C で弾性率がほぼ等しく

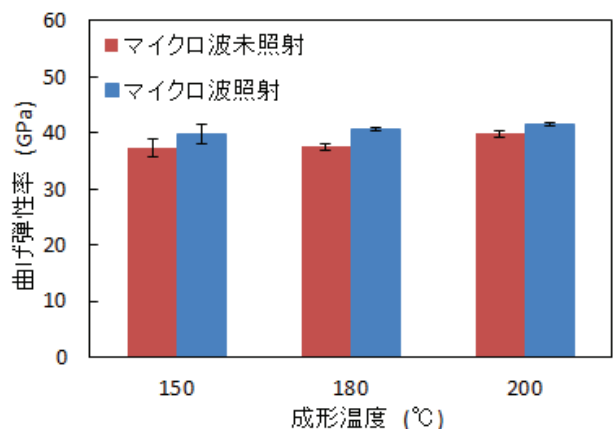


図 5 成形温度が異なる CFRTP 積層板の曲げ弾性率に及ぼすマイクロ波照射の影響

なっている。すなわち、成形温度が低くてもマイクロ波を照射することにより曲げ弾性率を向上させることができることがわかる。

図 6 は大気圧下で積層板をホットプレス成形した後、各出力のマイクロ波を照射したときの CF RTP 積層板の断面の光学顕微鏡写真を示す。マイクロ波未照射 (0 W) ならびに出力 150 W 時は、炭素繊維クロスの中の樹脂層に空洞のような初期欠陥が確認できる。これは大気圧下でホットプレスし、気泡が抜けずに成形したためと考えられ、マイクロ波の 150 W 照射ではその初期欠陥が十分に修復されていないと考えられる。

一方、500 W 照射時には母材と炭素繊維クロスの間面に剥離が見られる。これは、マイクロ波加熱による繊維と母材の熱膨張率差に起因した熱応力により発生したと考えられる。今回の成形条件に対して最も適切と考えられる 250 W 照射時には、このような内部欠陥は見られない。これは、マイクロ波照射による加熱によって母材である熱可塑性樹脂が溶融し、内部欠陥を修復したものと考えられる。

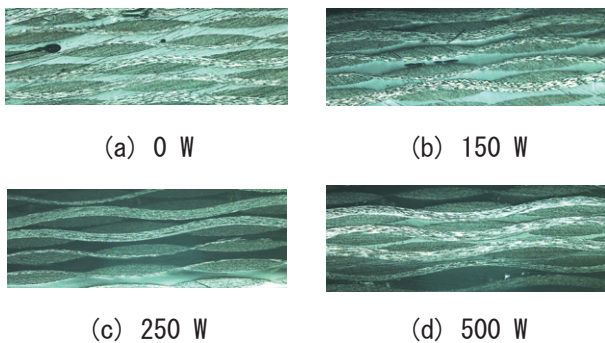


図 6 CF RTP 積層板の内部構造に及ぼすマイクロ波出力の影響

結言

本研究では、大気圧下でホットプレス成形した CF RTP 積層板の帯状試験片に条件の異なるマイクロ波を照射し、曲げ弾性率、曲げ破壊応力、曲げ破壊ひずみに及ぼすマイクロ波照射の影響を検討した。また、成形温度の異なる試験片へのマイクロ波照射の影響も検討した。

本研究により得られた主な知見は以下の通りであ

る。

- (1) 大気圧下でホットプレス成形した CF RTP 積層板の曲げ弾性率は、適切な条件でマイクロ波を照射することにより向上する。
- (2) CF RTP 積層板の破壊に関しては、3 点曲げの場合は炭素繊維クロスが荷重を支えるため、曲げ破壊応力にマイクロ波照射の影響が系統的には現れない。
- (3) 低い成形温度でもマイクロ波を照射することにより、高い成形温度の CF RTP 積層板と同等の曲げ弾性率が得られる。
- (4) CF RTP 積層板の光学顕微鏡による断面観察より、マイクロ波照射が積層板の内部構造に及ぼす影響を確認した。

文献

- Benitez, R., Fuentes, A., & Lozano, K. (2007). Effects of microwave assisted heating of carbon nanofiber reinforced high density polyethylene. *Journal of Materials Processing Technology*, 190, 324-331.
- Nguyen, P.N.D., Kubouchi, M., Sakai, T., Roces, S.A., Bacani, F.T., Yimsiri, P., & Tan, R.R. (2012). Relationship of mechanical properties and temperature of carbon fiber-reinforced plastics under microwave irradiation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14, 943-951.
- 西正人, 鎗木哲志, 黒瀬雅詞, 平島禎, 倉敷哲生 (2014). 「有限要素法による織物強化熱可塑性樹脂のプレス成形解析」『日本機械学会論文集』80(820), DOI: 10.1299.
- 水野衛, 小林天翔, 細井証宏, 施建 (2015). 「炭素繊維強化熱可塑性プラスチック CF RTP のホットプレス成形積層板に及ぼすマイクロ波照射の効果」『秋田県立大学ウェブジャーナル B』2, 1-5.

〔平成 28 年 7 月 20 日受付〕
〔平成 28 年 7 月 31 日受理〕

Effects of Microwave Irradiation on Mechanical Properties of Carbon-Fiber-Reinforced Thermoplastic (CFRTP) Laminates Molded by Hot-Pressing at Atmospheric Pressure

Mamoru Mizuno¹, Shohei Suyama², Masahiro Hosoi³, Jian Shi¹

¹ *Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

² *Former student of Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University (at present, Makino Milling Machine Co., Ltd.)*

³ *Course of Machine and Intelligence Systems, Graduate School of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

In a previous study, we hot-press molded carbon-fiber-reinforced thermoplastic (CFRTP) laminates under both atmospheric pressure and vacuum conditions. We then measured the bending fracture stress and bending elastic modulus of the CFRTP laminates molded under both conditions and compared the results. The CFRTP laminates were subsequently subjected to microwave irradiation, and the effect of the irradiation on the bending fracture stress was investigated. The results showed that the bending fracture stress of CFRTP laminates within artificial defects molded at atmospheric pressure was increased by the microwave radiation treatment. The aim of microwave irradiation is to improve the material properties of laminates molded under atmospheric pressure, which is not a good molding condition for laminates, such that they are equivalent to or exceed those of laminates molded under vacuum. In the present study, CFRTP laminates molded by hot-pressing at atmospheric pressure were subjected to microwave irradiation under different irradiation conditions and the effects of the irradiation conditions on the bending elastic modulus, bending fracture stress, and bending fracture strain were subsequently investigated. As a result, the optimum irradiation condition was observed to cause an increase of the bending elastic modulus. Finally, the influence of the irradiation on the microscopic structures of CFRTP laminates was elucidated through cross-sectional observations of specimens using an optical microscope.

Keywords: CFRTP, Microwave, Hot-pressing, Bending elastic modulus, Bending fracture stress, Cross-sectional observation