

炭素繊維強化熱可塑性プラスチック CFRTP 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

水野衛¹, 小林天翔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 本田技研工業 (株))

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

熱可塑性樹脂を炭素繊維で強化した炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (CFRTP) は、軽くて強く成形性が良いことから、燃費向上を目的とした自動車の構造材料として期待されている。CFRTP のプリプレグシートを積層しホットプレスで積層板を成形する場合、シート間の空気を抜く目的から真空中で成形される。本研究では成形時間を短縮し、コストを削減する目的から大気圧で積層板を成形し、マイクロ波照射によって材料特性を改善することを試みた。マイクロ波加熱はエネルギー変換効率が良く、短時間で選択的・局所的に加熱することが可能である。以上のことから本研究では、CFRTP 積層板を真空と大気圧で成形し、曲げ破壊応力、曲げ弾性率の差異を測定し、マイクロ波を照射することによるこれらの材料特性への影響を検討した。さらに、マイクロ波による選択的な加熱特性を利用し、局所的な発熱を赤外線サーモグラフィで測定することによる層間剥離などの非破壊検査への応用の可能性も検討した。その結果、大気圧下で成形した積層板は真空中で成形した積層板より曲げ破壊応力が低いが、マイクロ波を照射することにより曲げ破壊応力が向上し、CFRTP 積層板の層間剥離の端部での局所的な発熱を赤外線サーモグラフィで確認した。

キーワード: CFRTP, マイクロ波, ホットプレス成形, 曲げ破壊応力, 層間剥離, 赤外線サーモグラフィ

化石燃料の高騰・枯渇への懸念、CO₂ の温室効果問題など、自動車に対する省エネ技術の開発は現代社会において必須である。材料強度の観点からは軽くて強い材料の開発、リサイクルも含めた利用方法の研究が進められている。また、電気自動車や燃料電池車においても航続距離を伸ばすためには同様である。このような背景から、自動車の軽量化を目的として炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の使用が進められている。なかでも、炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (CFRTP) は母材に高温で溶け成形性が良い熱可塑性樹脂を使用することで、製造、修理、リサイクルが容易に行える利点を有している。さらに、製造プロセスの簡易化によるコスト削減や自動

車の廃棄に伴うリサイクル性を考えれば、CFRTP は自動車の構造材料として最も期待されており、実用化が進められている (西, 鐺木, 黒瀬, 平島, 及び倉敷, 2014)。

CFRTP の積層板をプリプレグシートを積層して成形する場合、シート間の空気を抜き成形時の欠陥を排除するため真空状態でホットプレス成形がなされる。それは、成形時の内部欠陥が強度などの材料特性に影響を及ぼすためである。また、CFRTP の積層板を実際に製品として使用する場合、重く硬い物を落としたりぶついたりすると、その衝撃荷重が CFRTP に層間剥離などの内部損傷をもたらす (Mizuno, Ogawa, & Fujii, 2013)。これらの内部損傷

は非破壊検査法により検査を行い、場合によっては補修を行うことになる。

ところで、食料品など電子レンジで加熱を行うが、マイクロ波による加熱の特徴は、選択的加熱が可能であり、加熱速度が速く、エネルギー効率も良いことである。一般に、CFRP にマイクロ波を照射したとき、炭素繊維と母材であるプラスチックとの界面での分極に起因した発熱が得られる (Benitez, Fuentes, & Lozano, 2007)。したがって、CFRP をマイクロ波を使って加熱すれば、炭素繊維と母材界面での選択的加熱が可能であり、成形時の界面強度の向上や、界面での熱応力を利用しリサイクル時の繊維と母材の分離などに応用する研究が報告されている (Benitez et al., 2007 ; Nguyen et al., 2012)。

そこで本研究では、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の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に関する検討を行う。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行い、その局所的発熱を赤外線サーモグラフィによって測定することによる新しい非破壊検査法 (阪上, 2003a, 2003b) の検討を行う。

実験方法

CFRTP のプリプレグとして三菱レイヨ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、4層または6層に積層してホットプレスで積層板を作製した。なお、人工欠陥を有する試験片を作製するため、シートの中央部に幅 20 mm のカプトン粘着テープ 650s (寺岡製作所製) を挿入した積層板も作製した。ホットプレスは真空と大気圧下で行い、いずれの場合も加熱温度は 180 °C、加圧は 7.9 MPa とした。積層板はダイヤモンドブレードを装着した水冷式の複合材料切断機 (丸東製作所製 AC-300CF) で幅 10 mm に切断し、 100×10 mm の帯状試験片を作製した。

帯状試験片は支点間距離 30 mm の治具を用いて3点曲げを行い、曲げ弾性率と曲げ破壊応力の測定を行った。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、4層と6層の試験片に対し、それぞれ $V=1.15, 0.78$ mm/min とした。

ホットプレスで成形した CFRTP 積層板に及ぼすマイクロ波照射の効果を検討するため、 100×10 mm の帯状試験片に対しマイクロ波を照射した。マイクロ波は、市販の業務用電子レンジ RE-7500 (シャープ製) を用いて、レンジ庫内に設置した試験片に対し、150 W の出力で 60 s (4層の試験片) と 120 s (6層の試験片) 照射した。なお、マイクロ波照射による CFRTP の発熱状況を確認するため、赤外線サーモグラフィ (NEC Avio 赤外線テクノロジー製 InfReC R300) を用いて CFRTP 試験片の温度変化を測定した。

実験結果

図 1 にプリプレグを 4層重ねた積層板を 3点曲げ試験で破壊したときの破壊応力を示す。曲げ試験は複数回行い、その平均値とばらつきも図に示している。真空でホットプレスした積層板の方が大気圧でホットプレスした積層板より破壊応力が高い。また、試験片中央部に人工欠陥を挿入することにより破壊応力が低くなることがわかる。

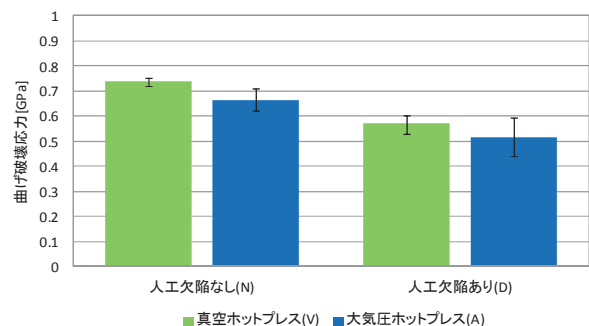


図 1 CFRTP 積層板 (4層) の 3点曲げ破壊応力

図 2 にプリプレグを 6層重ねた積層板を 3点曲げ試験で破壊したときの破壊応力を示す。図 1 の 4層の場合と比較すると、真空でホットプレスした 6層の試験片は全体的に破壊応力が低くなる傾向にある。これは積層数が増え、試験片の厚さも増し、曲げによる層間剥離が起きやすくなったためと考えられる。一方、大気圧でホットプレスした試験片は破壊応

力に著しい変化は見られない。これは元々大気圧下での成形ではプリプレグのシート間の空気が十分抜けず、初期欠陥が残っているため、積層数に関わらず層間剥離は起きやすく、破壊応力も変わらなかったと考えられる。

また、大気圧下で人工欠陥を入れて積層板を成形した場合、破壊応力のばらつきが大きいのが分かる。特に積層数が多いほどばらつきも大きい。これは、ホットプレス成形時にシート間に空気が封入される初期欠陥のばらつきも大きくなるためと考えられる。

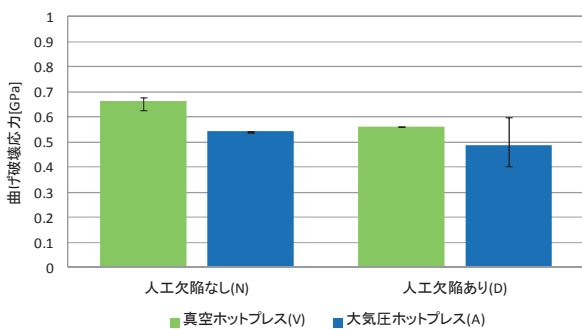


図2 CFRTF 積層板 (6層) の3点曲げ破壊応力

図3にプリプレグを4層重ねた積層板の3点曲げ試験から得られた応力-ひずみ線図の除荷時の傾きから評価した曲げ弾性率を示す。基本的に成形条件による曲げ弾性率の変化は図1に示した破壊応力の時と同じである。したがって、弾性率の変化から内部損傷の状態を評価し、破壊応力を予測できる可能性が検証された。

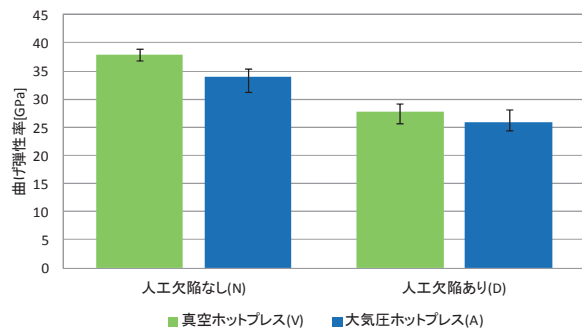


図3 CFRTF 積層板 (4層) の3点曲げ弾性率

図4にプリプレグを4層重ねた積層板にマイクロ波を照射した後、3点曲げ試験を行ったときの破壊

応力を示す。真空下でホットプレス成形した試験片は若干破壊応力が低下している。これは、マイクロ波加熱により繊維と母材の熱膨張率の差に起因した熱応力により内部損傷が生じたためと考えられる。

一方、大気圧下でホットプレス成形した試験片、特に内部欠陥を挿入した試験片に関しては明らかに破壊応力が上昇している。これは、人工欠陥挿入部の端面が選択的に加熱され、そこで局所的に発熱が起きており、その熱で層間接着が改善され、強度が増したと考えられる。

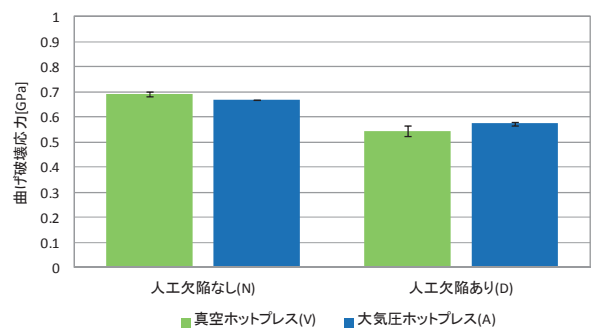


図4 マイクロ波を照射したCFRTF 積層板 (4層) の3点曲げ破壊応力

図5,6にプリプレグを4層重ね真空でホットプレスした積層板をマイクロ波で45s加熱した時点での温度分布を示す。図5は人工欠陥を挿入していない試験片、図6は人工欠陥を挿入した試験片に対する測定結果である。いずれもテフロン製の円柱の上に試験片を置いて電子レンジの庫内でマイクロ波を照射し加熱しているため、テフロン円柱を通じた熱の拡散が見られる。しかし、試験片自体はマイクロ波により発熱しており、図6の人工欠陥のある試験片の方が、中央部と周辺部との温度差がはっきりと見られる。本研究からマイクロ波照射によるCFRTFの発熱は確認できたが、図5と6を比較したとき、内部欠陥を明確に識別するだけの温度分布の違いは得られていない。その理由の一つとして、本研究ではプリプレグシート間にカプトンテープを挿入して人工欠陥としている。図1~3に示すように破壊応力や弾性率には人工欠陥として影響を及ぼすが、発熱や熱伝導が変わるほどの内部欠陥(空洞)にはなっていないためと考えられる。したがって、マイクロ波

照射による発熱を利用した内部欠陥の非破壊検査については、今後内部欠陥の生成あるいは人工欠陥の挿入の仕方を検討する必要がある。

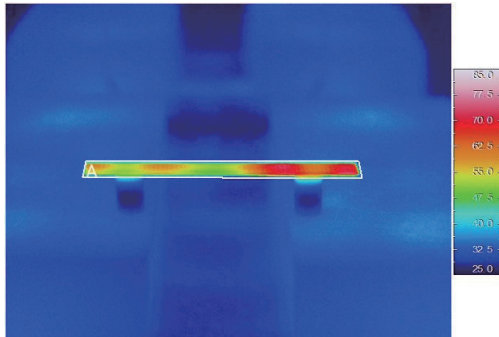


図5 マイクロ波加熱（45 s）した CFRTP 積層板（4 層，真空ホットプレス，人工欠陥なし）の温度分布

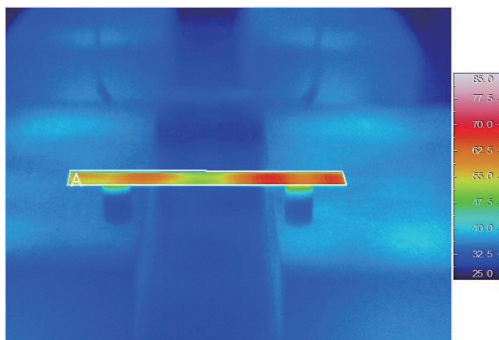


図6 マイクロ波加熱（45 s）した CFRTP 積層板（4 層，真空ホットプレス，人工欠陥あり）の温度分布

結言

本研究では、CFRTP のプリプレグを 4 層または 6 層積層し、真空または大気圧下でホットプレスにより積層板を作製した。積層板を作製する際、プリプレグシートの中央部にカプトンテープを挿入し、人工欠陥を含む積層板も作製した。積層板は幅 10 mm に切断し、帯状試験片を作製して 3 点曲げ試験を行った。また、帯状試験片にマイクロ波を照射し、機械的性質におよぼす影響を検討し、また、人工欠陥を含む試験片の発熱状況を測定した。得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 大気圧下で成形することにより、曲げ破壊応力、曲げ弾性率とも真空で成形した試験片より低下した。
- (2) 人工欠陥を挿入することにより、曲げ破壊応力、曲げ弾性率ともに低下した。
- (3) 帯状試験片にマイクロ波を照射することにより、大気圧下で人工欠陥を挿入した試験片の曲げ破壊応力が向上した。
- (4) CFRTP にマイクロ波を照射することによる発熱を赤外線サーモグラフィで測定したが、人工欠陥を明確に識別できる程の情報は得られなかった。

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.
- Mizuno, M., Ogawa, A., & Fujii, G. (2013). Variation in thermal conductivity of CFRP plates due to impact damage. *Proceedings of the 13th International Conference on Fracture*, Beijing, China, (in USB).
- 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.
- 阪上隆英 (2003a). 「赤外線サーモグラフィによる構造物の非破壊検査」『溶接学会誌』72(4), 251-255.
- 阪上隆英 (2003b). 「赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定」『溶接学会誌』72(6), 511-515.

〔平成 27 年 6 月 30 日受付〕
〔平成 27 年 7 月 31 日受理〕

Effects of Microwave Irradiation on Hot-Press Formed Laminates of Carbon-Fiber-Reinforced Thermoplastics (CFRTPs)

Mamoru Mizuno¹, Tensho Kobayashi², 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, Honda Motor Co., Ltd.)*

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

Carbon-fiber-reinforced thermoplastics (CFRTPs) are expected to be used in automobiles as structural materials for achieving high fuel efficiency because of their low density, high strength, and good formability. When pre-impregnated (prepreg) sheets of CFRTPs are stacked and laminates are formed by hot-pressing, the forming process is conducted under vacuum to release air between the sheets. In the present study, we formed laminates at atmospheric pressure and attempted to improve their material properties by subjecting them to microwave irradiation to reduce their forming time and cost. Microwave heating provides high energy conversion efficiency and enables selective and local heating within a short time. Accordingly, in the present study, CFRTP laminates were formed under both vacuum and atmospheric-pressure conditions, and the changes in the laminates' bending fracture stress and elastic modulus were measured. The effect of microwave irradiation on the material properties is discussed. Moreover, because selective microwave heating can induce the local generation of heat, we investigated the applicability of measuring the generated heat using infrared thermography as a non-destructive method of inspecting for delamination. Therefore, the bending fracture stress of laminates formed under atmospheric pressure, which was increased by microwave irradiation, was observed to be lower than that of laminates formed under vacuum. Furthermore, the local generation of heat at the end completion of artificial delamination was confirmed by infrared thermography.

Keywords: CFRTP, Microwave, Hot-pressing, Bending fracture stress, Delamination, Infrared thermography