炭素繊維/PP モデル試験片を用いた

炭素繊維の選択的加熱による界面はく離の修復に関する研究†

三宅 卓志* 伊藤 優汰** 二村 道也***

Repair of Interfacial De-bonding in a Single Carbon Fiber/PP Model Composite by Means of Selective Direct Heating of Carbon Fiber Inside

by

Takushi MIYAKE*, Yuta ITO** and Michinari FUTAMURA***

Our previous work demonstrated that selective induction heating of carbon fibers increases the flexural modulus of CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics) injection-molded products, indicating that selective heating of carbon fibers offers the possibility of repairing interface debonding in CFRTP. In this study, it is demonstrated that selective heating of carbon fibers using a focused halogen lamp can repair interfacial debonding in a monofilament model composite consisting of carbon fiber monofilaments and a polypropylene resin matrix, without requiring external pressure. The stress distribution in the stress recovery region around the fiber end was monitored before and after heating using a micro-Raman spectrometer. The debonding region and shear strength of the rewelded interface were evaluated from the fiber stress profile. Varying the heating conditions revealed that the reweld interface strength recovered to full virgin strength when it was heated for a short period of time at high power. In contrast, the rewelded interface strength was found to decrease after a long period of heating at low power. The shear strength of the repaired interface was also found to vary with the embedding depth of the fibers.

Key words:

CFRTP, Repair, Interfacial de-bonding, Re-welding, Local heating, Interfacial adhesion, micro-Raman spectroscopy

1 緒 言

炭素繊維を強化材として用いた樹脂マトリックス複合材料 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) は、優れた比強度を持つことから、大型部材に使用した場合に軽量化の効果が大きい。また、大型部材や大型部品を一体成形すれば組立や接合が不要となり、コストや重量の低減効果も期待できる。さらに一体成形には、高いデザイン自由度といったメリットも見込まれる。しかしその一方で、一体化した大型部品では、製造欠陥や使用中の損傷、寿命の不均一などに起因して発生する不良が部分的であるにも関わらず、全体を廃棄しなければならないというリスクが生じる。また、CFRP はリサイクルが困難であるので、使用に伴う損傷や劣化を修復しながら長期間使用することが強く望まれる。そのため、CFRP 部材の使用拡大につれて、資源環境の観点からも CFRP 部材中の損傷を修復して強度回復する技術への要求が高まっている。

このような背景から、様々な CFRP の修復技術が研究されている¹⁾。表面に近い損傷は、概ねパッチ接着により修復可能であるが、内部の損傷修復は困難な場合が多い。熱硬化性樹脂をマトリックスに用いる CFRP では、内部

の損傷は主として修復剤を用いてき裂を再接着する方法がとられている。しかし、修復剤を用いる方法では、中空繊維やマイクロカプセル等に修復剤をあらかじめ包含させた特殊な材料を用いる必要があるなど^{2,3)}汎用性に欠けるという課題がある。これに対し、熱可塑性樹脂をマトリックスに用いた CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics) は、加熱により樹脂を溶融させて繊維と再溶着できることから、材料や修復箇所などの制約なく損傷を修復できる可能性がある。このような観点から、加熱による CFRTP の修復技術が研究されている。しかし、溶融再凝固時に繊維とマトリックスを密接させるため加圧することが必要となるが、マトリックス樹脂を溶融させると形状が維持できなくなるため、加圧には型を使用しなければならないこととなる。このため、損傷を与えた単純な板形状試験片に対し加熱プレス前後の強度を測定した基礎的な例があるだけである^{4,5)}。

一方、筆者らは MHz 帯の電磁誘導加熱 IH (Induction Heating) を用いて CFRTP 射出成形体中の炭素繊維を急速加熱し、炭素繊維の周辺のみを局所的に加熱した場合の、加熱前後における成形体の曲げ特性や伝熱特性の変化に

† 原稿受理 令和2年9月28日 Received Sep. 28, 2020 ©2021 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 岐阜大学 Guコンポジット研究センター 〒501-1193 岐阜市柳戸
Composite Materials Research Center., Gifu Univ., Yanagido, Gifu 501-1193.

** 岐阜大学 工学研究科 〒501-1193 岐阜市柳戸
Graduate School of Eng., Dept. of Mechanical Eng., Gifu Univ., Yanagido, Gifu 501-1193.

*** 名古屋市工業研究所 〒456-0058 名古屋市熱田区六番
Nagoya Municipal Industrial Research Institute, Rokuban Atsuta-ku, Nagoya 456-0058.

ついて研究を行ってきた⁶⁾。その結果、射出成形体の曲げ弾性率がIH加熱後に向上するという結果が得られている。一度IH加熱した後の再加熱時の試料表面の昇温速度も曲げ弾性率の向上に対応して増加することから、再溶着による界面接着面積の増加の可能性がある⁷⁾。もし、外部からの加圧なしに繊維の選択的な加熱のみで繊維/樹脂マトリックス界面を十分な強度で再溶着できれば、型を使用せずに、必要な個所にのみ適用できる“in field”型の修復方法の開発が可能である。

そこで、本研究では繊維一本からなるモデル試験片を用いて、繊維のみの選択的加熱により界面はく離部が再溶着可能かどうか検討を行った。単繊維炭素繊維/ポリプロピレン PP (Polypropylene) 樹脂からなる試験片をハロゲンランプにより照射し、炭素繊維と樹脂の光吸収率の差を利用して炭素繊維のみを選択的に加熱することにより、あらかじめ界面はく離を発生させた領域が加熱後に再溶着するかどうか調べた。界面のはく離発生、再溶着の判定や領域の特定は、顕微ラマン分光により測定した引張時の繊維端部近傍（応力回復領域）の繊維応力分布から行った。また界面せん断強度を繊維応力分布から求め、加熱前後の界面せん断強度を比較することにより、再溶着による界面接合強度の回復率を評価した。加熱条件を変化させた実験により、再溶着範囲や界面強度に対する加熱条件の影響について検討を行うとともに、繊維埋込み深さを変えて樹脂溶融域の境界条件を変化させた実験を行い、界面の再溶着強度に差が発生するか調べた。

2 試料および実験方法

2・1 試料および試験片

モデル試験片は、繊維に高弾性タイプ PAN 系炭素繊維（三菱ケミカル（株） M46JB）を用い、厚さ 1 mm のポリプロピレン板（アズワン（株） PPN-050501）と厚さ 40 μm の無延伸ポリプロピレンフィルム（東洋紡（株） P1011）の間に挟んで加熱加圧して作製した。0.3 MPa で加圧した状態で常温から 190℃まで昇温し、2 min 保持後加圧したまま徐冷した。その後繊維長手方向が試験片長手方向と一致するように加工し、Fig. 1 に示すような板状試験片とした。引張時に繊維端から発生する応力回復領域における繊維応力を測定するため、繊維端が観察可能なよう 15 mm 長の繊維を試験片中央にくるようにした。また、繊維埋込み深さを浅くした試験片の場合は、表面研磨により埋込み深さを 10 μm とした。

Fig. 1 CF / PP single fiber model composite shape.

2・2 加熱による界面修復実験

加熱による界面修復実験手順を Fig. 2 に示す。具体的には、次に示す 4 つの手順からなる。まず、最初に界面はく離を発生させるため 100 N の引張荷重を加え、実際にははく離が発生したかどうか確認するため顕微ラマン分光により繊維端近傍を走査して繊維応力分布を測定した (Fig. 2(i))。次に、界面を再溶着させるためハロゲンランプにより繊維を選択的に加熱した (Fig. 2(ii))。その後、界面はく離を発生させた引張荷重 100 N より小さい引張荷重 30 N を加えて繊維応力分布を測定し、100 N で界面はく離した領域が再溶着したかどうか確認した (Fig. 2(iii))。最後に、加熱前に界面はく離を発生させた引張荷重と同じ 100 N を再度負荷して繊維応力分布を測定した。はく離領域の大きさや発生する界面せん断応力について初期 100 N 負荷時のものと比較した (Fig. 2(iv))。

加熱に用いた装置は、1000 W、電力密度 55 W/cm の発光長 182 mm の集光型のハロゲンランプ（岩崎電気（株） IRE182-N）である。MHz 帯の IH でなくハロゲンランプを用いた理由は、試験片中の単繊維が IH ではほとんど加熱されなかったためである。ハロゲンランプの放射光波長帯に近い波長 940 nm ダイオードレーザを用いた透過型レーザ溶着の実験において、レーザ光が PP を透過しカーボンブラック 2 wt% を含有した PP との重畳せ界面が溶融することが示されている⁸⁾ことから、ハロゲンランプを用いて PP 中の炭素繊維を選択的に加熱することを試みた。ハロゲンランプの放射光が強度ピークをもつ波長 1~1.1 μm 領域⁹⁾での PP の吸収率は 10% 以下であり¹⁰⁾、一方グラファイトの吸収率は 95% を超える¹¹⁾

Fig. 2 Experimental procedure for repairing interface de-bonding by IR heating.

ことから、この吸収率の差を利用した。焦点距離 25 mm の放物線型の反射鏡により幅 2 mm の線状に集光し、試料表面が焦点位置にくるように設置して照射した。加熱速度を変化させることを目的に、シャッターにより照射時間を変えた。その場合、照射エネルギーが一定となるようにランプ電圧を制御した。すなわち、200 V で 2 s 間加熱に対し、4 s 間加熱の場合は、照射光強度が約 1/2 となる 160 V とした¹²⁾。

2・3 繊維応力測定方法

繊維応力は繊維からのラマン散乱光を用いて評価した。ラマン散乱は、顕微ラマン分光装置（株）堀場製作所 SuperLabRam）を用いて行った。その構成概略を Fig. 3 に示す。顕微鏡の光学系を用い 632.8nm の He-Ne レーザ光を 100 倍の対物レンズにより集光し、炭素繊維表面で 1 μm 径スポットとなるよう照射した。軸方向分布は、試験片を x-y ステージで移動させて、繊維端から約 1mm 範囲を 20~250 μm 間隔で繊維長手方向に走査して得た。試験片への負荷は、顕微鏡試料台に積載可能な自作小型負荷装置により行った。チャックに固定した試験片を負荷フレームにピン接続し、ステッピングモータ駆動の小型電動シリンダ（オリエンタルモータ（株）CPMS15B1B-01D）を用いて所定の引張負荷を加えた後変位を固定してラマン分光測定した。荷重は試験片チャックに直列に接続した容量 500N の小型ロードセル（WAZAU NMDZ-AF-500）により検出した。得られたラマン散乱光スペク

Fig. 3 Schematic diagram of the microscopic Raman spectroscopy measurement system.

Fig. 4 Calibration relationship between Raman shift and tensile stress of carbon fiber monofilaments.

トルはローレンツ-ガウス型関数でピークフィット処理（株）堀場製作所 LabSpec）し、2700 cm⁻¹ 帯におけるピーク波数を求めた。ピーク波数から繊維応力への換算には、単繊維フィラメントにローラを介して錘で引張荷重を漸増しながら測定¹³⁾して得た測定結果を直線近似した Fig. 4 に示す校正直線を用いた。

3 試験結果

3・1 加熱前後における繊維応力分布

Fig. 5 に、負荷増加に伴い界面はく離が発生する過程での、繊維端近傍の繊維応力と界面せん断応力の軸方向分布を模式的に示す。繊維応力分布は、これまでの顕微ラマン分光を用いた測定により明らかにされており¹⁴⁾¹⁶⁾、また界面せん断応力 τ_i は次式の関係を用いて繊維応力から求めることができる。

$$\tau_i = (r_f/2)(\partial\sigma_f/\partial z) \quad (1)$$

ここで、 r_f は繊維半径、 z は繊維端からの距離である。界面が完全接着し引張荷重が小さい時は（図中(1)）、シアラグ理論による予測どおりの応力分布を示すが、引張荷重が増加するにつれて（図中(2)）、界面周辺樹脂の塑性変形や界面の部分的な破損により繊維応力分布は s 字型カーブとなり、これに対応して界面せん断応力はピークを持つ山型となる。さらに負荷が増加すると（図中(3)）、繊維端側に繊維応力が生じない領域が発生する。この領域は式(1)より界面でせん断応力が発生しないから、界面はく離が生じていると判断できる。また、界面せん断応力分布におけるピーク値は界面が接着を維持できる最大のせん断応力であるから、界面せん断強度に相当すると考えられる。このように繊維応力および界面せん断応力の分布から界面の接着状態が判定可能である。

Fig. 6 に、200 V で 2 s 間加熱した試験の繊維応力分布を示す。作製後初めて 100 N 負荷した時の応力分布である Fig. 6(a) から、繊維端からの距離 $z < 380 \mu\text{m}$ で繊維軸方向応力 σ_f がほぼ零であり、 $380 \mu\text{m} < z$ に応力回復領域が現れることがわかる。 $z < 380 \mu\text{m}$ 領域では界面せん断応力

Fig. 5 Schematic of the fiber stress and the corresponding interfacial shear stress around the fiber end with interfacial de-bonding.

τ_i が発生しないから、 $z < 380 \mu\text{m}$ まで完全な界面はく離が発生したことがわかる。Fig. 6(a)中の加熱後に引張荷重 30 N を負荷した場合の繊維応力分布を見ると、加熱前 100 N 負荷時には σ_f が発生しなかった $z < 380 \mu\text{m}$ の範囲に繊維応力 σ_f が生じており、 σ_f の発生している $100 \mu\text{m} < z$ 領域は、界面が接着していると判定できる。加熱前 100 N 負荷時には $z < 380 \mu\text{m}$ の範囲は界面はく離していたから、ハロゲンランプ加熱により、はく離した界面が再溶着したことがわかる。一方、繊維端に近い $100 \mu\text{m} > z$ 領域では界面はく離が発生している。加熱前の 100 N 負荷ではく離した部分が再溶着しなかったのか、加熱後の 30 N 負荷時にはく離を起こしたのか判別できないが、他の試験片において製造後初めて 30 N 負荷した時に同程度の長さのはく離発生が観察されていることから (Fig. 8(a))、この領域は加熱により再溶着したが加熱後 30 N 負荷時に再度はく離したものと考えられる。

加熱後 100 N 負荷時の繊維応力を加熱前 100 N 負荷時のそれと比べると、加熱後の $350 \mu\text{m}$ 箇所を除いてほぼ同じ分布を示すことがわかる。 $350 \mu\text{m}$ 箇所の応力は、前後測定位置の繊維応力が共にほぼ零であることから誤差によるものと考えられる。本研究では主に Fig. 5 に示すような応力分布の変化に着目するから、このような突発的な誤差による本質的な影響はないと考えられる。すなわち、繊維応力 σ_f が発生しない界面はく離領域の大きさは、加熱前が $z < 380 \mu\text{m}$ 、加熱後が $z < 400 \mu\text{m}$ と大きな差は認められない。Fig. 6(b)に、式 (1)を用いて求めた加熱前後の 100 N 負荷時の界面せん断応力 τ_i の分布を示す。 τ_i の計算には、 σ_f の測定値を線形補完した後測定値の変動の影響を取除くため SG (Savitzky-Golay) 法で 5 点移動平均して平滑化したデータを用いた。図より 100 N 負荷時の τ_i の分布は、加熱前後でほとんど差がないことがわかる。また、 τ_i の分布は零から増加してピークを示す。このピーク値を比べると加熱前後ともおよそ 10 MPa であり、このピークは、界面接着が保持できる最大のせん断応力とみなすこ

Fig. 6 Fiber stress and interfacial shear stress distributions before and after heating at 200 V for 2s.

とができるから、界面せん断強度は製造初期の界面せん断強度にまで回復することがわかる。また、この界面せん断強度は、未処理の炭素繊維/PP に対しマイクロドロップレット法で得られている他の報告と比較して大きい¹⁷⁾、概ね同じである¹⁸⁾。

3・2 加熱条件による繊維応力分布の違い

Fig. 7(a)に、160 V で 4 s 間加熱した試験の繊維応力分布を示す。図中に示す加熱前 100 N 負荷時の繊維応力分布から、繊維応力 σ_f が発生しない界面はく離が生じている領域が $z < 400 \mu\text{m}$ に発生していることが確認できる。このはく離領域は、200 V、2 s 間加熱に用いた試験片の結果とほぼ同じであり、本実験で使用了試験片間の変動が小さいことがわかる。加熱後の 30 N 負荷時の繊維応力は、200 V、2 s 間加熱の場合と同様に、繊維端に近い部分を除いて加熱前 100 N 負荷時に応力 σ_f が零の領域にも応力が発生している。すなわち、160 V、4 s 間の加熱条件でも界面が再溶着していることがわかる。しかし、加熱後 100 N 負荷時の結果は、200 V、2 s 間加熱の結果とは異なり、加熱前 100 N 負荷時の繊維応力分布と同じにはならない。具体的には、160 V、2 s 間加熱の場合、加熱後の繊維応力分布における $\sigma_f \cong 0$ の範囲が、加熱前の $z < 420 \mu\text{m}$ から $z < 500 \mu\text{m}$ に拡大していることがわかる。また、Fig. 7(b)に示す界面せん断応力について見ると、界面せん断強度であるピーク値が、加熱前の 11 MPa に比べ加熱後は 8 MPa と小さくなっている。すなわち、加熱条件は再溶着界面強度に影響があり、光強度が小さく照射時間が長い加熱条件では、光強度が大きく、照射時間の短い加熱条件と比べ再溶着強度は低くなる。加熱条件により昇温速度や到達最高温度、熔融領域も変化し、それに伴い冷却速度も変わるから、再溶着強度にどのパラメータがどのように影響しているか明確ではないが、急速に加熱する加熱条件の方が再溶着強度が向上するものと想定される。

Fig. 7 Fiber stress and interfacial shear stress distributions before and after heating at 160 V for 4s.

3・3 埋込み深さによる繊維応力分布の違い

熔融域の境界条件を変化させるため、繊維の埋込み深さを変えて試験を行った。繊維の埋込み深さを $10\ \mu\text{m}$ と被り厚を薄くした試験片を用い、 $200\ \text{V}$ 、 $2\ \text{s}$ 間加熱を行った。Fig. 8(a)に加熱前後の $30\ \text{N}$ および $100\ \text{N}$ 負荷時の繊維応力分布を、また Fig. 8(b)に加熱前後の $100\ \text{N}$ 負荷時の界面せん断応力分布を示す。加熱後の $30\ \text{N}$ 負荷時の繊維応力分布から、繊維埋込み深さ $10\ \mu\text{m}$ の場合も加熱により界面が再溶着することがわかる。一方、加熱後の $100\ \text{N}$ 負荷時の繊維応力分布から、加熱後の繊維応力が零の領域が約 $520\ \mu\text{m}$ と加熱前の $400\ \mu\text{m}$ に比べ拡大していることがわかる。界面せん断応力を見ると、加熱後には界面せん断強度であるピーク値が $7\ \text{MPa}$ と、加熱前の $10\ \text{MPa}$ に比べ低下している。Fig. 6 に示した繊維埋込み深さ $40\ \mu\text{m}$ 試験片の結果では、加熱後の $100\ \text{N}$ 負荷時の界面はく離領域や界面せん断強度は製造当初の $100\ \text{N}$ 負荷時と同じまで回復しており、両者の違いは繊維埋込み深さのみであるから、繊維周囲の境界条件の違いが両者の差を引起こしたものと考えられる。

4 検 討

繊維埋込み深さの違いのみで再溶着時の界面はく離領域の大きさや界面せん断強度に差が生じた理由を検討するため、繊維埋込み深さ $10\ \mu\text{m}$ の試験片の加熱後の表面性状を調べた。Fig. 9(a)に加熱後の試験片の表面の光学写真を示す。Fig. 9(a1)に示す繊維埋込み深さ $40\ \mu\text{m}$ の試験片の写真では、表面はほぼ変化が認められないのに対し、Fig. 9(a2)に示す繊維埋込み深さ $10\ \mu\text{m}$ の試験片の写真では繊維に沿って溶融痕が観察される。この溶融痕に対し直交方向の表面凹凸を非接触三次元形状測定装置（三鷹光器（株）NH-3N）を用いて測定した結果を、Fig. 9(b)に示す。溶融・再凝固痕は、幅約 $150\ \mu\text{m}$ 、最大深さ $4\ \mu\text{m}$ の窪みとなっていることがわかる。図中には加熱後の埋込み深さ

Fig. 9 Micrographs of the sample surface after heating and their surface profiles.

Fig. 10 Schematic of melting state of resin around a heated fiber embedded at different depth.

$40\ \mu\text{m}$ の試験片の表面凹凸測定結果も示してあるが、埋込み深さ $40\ \mu\text{m}$ の試験片ではこのような窪みは観察されない。埋込み深さが $40\ \mu\text{m}$ の場合には加熱時の樹脂熔融域が試験片表面まで達しないが、埋込み深さが $10\ \mu\text{m}$ と浅い場合には表面にまで達していることがわかる。すなわち、Fig. 10 に模式的に示すように、埋込み深さが浅い場合、加熱時に樹脂熔融域の一部が表面に達して自由膨張し、収縮に伴いひけが発生するが、これに対し埋込み深さが深い場合には、固体状態の樹脂に周囲拘束された状態で溶融、凝固したと考えられる。

この溶融、再凝固時の境界条件の違いと Fig. 8(b)に示した再溶着時の界面せん断強度の差を対応させると、次のような可能性が考えられる。CFRTP の機械的特性に成形時の圧力が影響すること¹⁹⁾や、樹脂同士の熱溶着においても加圧力により溶着強度が変化すること²⁰⁾が報告されているから、溶着界面強度への圧力の影響は無視できないものと考えられる。溶融時に発生する圧力について考えると、Fig. 10 の模式図中に示すように推察される。繊維周辺のみが溶融し熔融部の周辺樹脂が固体のままであれば、溶融に伴う体積膨張に起因して界面方向への圧縮圧力が発生するが、繊維埋込み深さが浅い場合には、試料表面に達した熔融域が自由膨張することから、発生する圧力は小さくなると想定される。このような繊維埋込み深さの違いに起因する樹脂溶融に伴い発生する界面への圧力の大小が再溶着時の界面せん断強度に影響した可能性が考えられる。3・2節に示した加熱条件の場合についても、通常狭い領域を急速に加熱する方が広範囲をゆっく

Fig. 8 Fiber stress and interfacial shear stress distributions before and after heating at $200\ \text{V}$ for $2\ \text{s}$ for a specimen with $10\ \mu\text{m}$ fiber embedded depth.

りと加熱する場合よりも局所的に大きな圧力を発生することが知られているから、繊維埋込み深さの場合と同様に発生圧力に差が生じ、これにより再溶着時の界面せん断強度に差が生じたものと推察される。このような再溶着メカニズムであるとする、表面近くの界面はく離の場合には溶融時に溶融樹脂を自由膨張させないような工夫が必要と考えられ、ローラやプレートなどで加熱領域表面を局所的に加圧することが必要になると想定される。また、繊維含有率が高い場合には、レーザやIHを用いて局所加熱し、加熱領域周囲に未溶融の樹脂を残存させながら走査することが有効と考えられる。

5 結 言

単繊維炭素繊維とポリプロピレンからなるCFRTPモデル試験片を用い、試験片中の炭素繊維のみを選択的に加熱することにより、はく離した界面を再溶着させることが可能かどうか検討した。界面はく離を発生させた試験片をハロゲンランプで加熱し、界面の溶着状態を顕微ラマン分光により測定した繊維応力分布から判定した。加熱前後で、同じ引張負荷時の繊維応力分布を比較し、再溶着領域の範囲や再溶着界面の強度回復率を調べた。また、加熱条件を変えた実験を行い、再溶着界面のせん断強度の差を調べた。再溶着挙動の理解のため、繊維埋込み深さを変えた試験片を用いて再溶着界面強度の変化について検討を行った。その結果、得られた知見は以下のようである。

- (1) ハロゲンランプを用いた炭素繊維の選択的加熱により繊維/樹脂マトリックス界面はく離が再溶着する。再溶着した界面のせん断強度は、加熱加圧して作製した試験片初期の界面強度と同じまで回復する。
- (2) 投入エネルギーは同じでも照射条件を変化させると再溶着した界面のせん断強度に差が生じる。光強度が小さく照射時間が長い照射条件の方が、界面せん断強度が低くなり、同じ負荷時の界面はく離領域は拡大する。
- (3) 繊維埋込み深さを10 μm と浅くした場合、埋込み深さが40 μm 場合に比べて同じ負荷時の界面はく離領域が拡大し、界面せん断強度が低くなる。埋込み深さが10 μm の試験片では、加熱後の試験片表面に溶融再凝固によるひけが観察されることから、溶融時の溶融樹脂の境界条件が影響したと推察される。

本修復方法のメカニズムについては、今後繊維温度の測定や発生圧力の見積り、繊維周辺樹脂の構造変化等の検討による解明が必要であるが、本論文では、加熱のみで外部からの圧力付加なしに界面を十分な強度で再溶着できる可能性を示した。

本研究の一部は、JSPS 科研費 16K06743 の助成を受けて行った。また、加熱に関してワイエス電子工業(株)代表取締役杉田良雄氏に協力頂いた。ここに記し心より感謝致します。

参 考 文 献

- 1) E.g., Department of Defense : Composite Materials Handbook, Volume 3. Polymer Matrix Composites, Chapter 8. Supportability, MIL-HDBK-17-3F, (2002).
- 2) G. Williams, R. Trask and I. Bond, "A self-healing carbon fibre reinforced polymer for aerospace applications", Composites: Part A, Vol.38, pp.1525-1532 (2007).
- 3) K. Sanada, T. Suyama and Y. Nassho, "Interlaminar shear strength and self-healing of spread carbon fiber/epoxy laminates containing microcapsules", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.66, No.4, pp.299-305 (2017).
- 4) G. Reyes and U. Sharma, "Modeling and damage repair of woven thermoplastic composites subjected to low velocity impact", Composite Structures, Vol.92, pp.523-531 (2010).
- 5) M. Kanesaki, C. Uchijo, M. Tanaka, H. Saito, M. Nishikawa, M. Hojo and I. Kimpara, "Repair of impact damage by thermal fusion bonding and recovery of residual compressive strength on CF/PA6 laminates", Journal of Japan Society for Composite Materials, Vol.41, No. 1, pp.33-44 (2015).
- 6) T. Miyake and K. Takenaka, "Monitoring and repair technique for interfacial debonding in carbon fiber reinforced thermoplastics by means of induction heating", 20th International conference on Composite Materials (ICCM-20), Copenhagen, Denmark, 2015 July.
- 7) T. Miyake, "Tansosenni kyoka fukugozairyo seikeitai oyobi sono seizohohou, narabini tansosenni kyoka fukugozairyo seikeitai no syufuku hohou", JP.6508510 (2019).
- 8) I. Hadriche, E. Ghorbel, N. Masmoudi and G. Casalino, "Investigation on the effects of laser power and scanning speed on polypropylene diode transmission welds", International Journal Advanced Manufacturing Technology, Vol. 50, pp.217-226 (2010).
- 9) Ushio Inc., <https://www.ushio.co.jp/jp/products/1071.html>
- 10) H. Liu, H. Jiang, D. Guo, G. Chen, Z. Yan, P. Li, H. Zhu, J. Chen and X. Wang, "Study on welding mechanism based on modification of Polypropylene for improving the laser transmission weldability to PA66", Materials, Vol. 8, pp. 4961-4977 (2015).
- 11) G. Neuer, "Spectral and total emissivity measurements of highly emitting material", International Journal of Thermophysics, Vol. 16, No. 1, pp.257-265 (1995).
- 12) Iwasaki Electric Co., Ltd., <https://www.iwasaki.co.jp/optics/chishiki/ir/23.html>
- 13) T. Miyake, S. Kokawa, N. Ohno and S. Biwa, "Evaluation of time-dependent change in fiber stress profiles during long-term pull-out tests at constant loads using Raman spectroscopy", Journal of Materials Science, Vol. 36, pp. 5169-5175 (2001).
- 14) N. Melanitis, C. Galiotis, P.L. Tetlow and C.K.L. Davies, "Interfacial shear stress distribution in model composites: the effect of fiber modulus", Composites, Vol. 24, No. 6, pp.459-466 (1993).
- 15) S. Goutianos, T. Peijs and C. Galiotis, "Mechanisms of stress transfer and interface integrity in carbon/epoxy

- composites under compression loading Part I: Experimental investigation”, Solids and structures, Vol. 39, pp.3217-3231 (2002).
- 16) A. K. Patrikis, M. C. Andrews and R. J. Young, “Analysis of the single-fiber pull-out test by the use of Raman spectroscopy, Part I: pull-out of aramid fibers from epoxy resin”, Composites Science and Technology Vol. 52, pp. 387-396 (1994).
- 17) Y. Liu, X. Zhang, C. Song, Y. Zhang, Y. Fang, B. Yang and X. Wang, “An effective surface modification of carbon fiber for improving the interfacial adhesion of polypropylene composites”, Materials & Design, Vol. 88, No. 25, pp. 387-396 (2015).
- 18) G. Caia, M. Wada, I. Ohsawa, S. Kitaoka and J. Takahashi, “Interfacial adhesion of recycled carbon fibers to polypropylene resin: Effect of superheated steam on the surface chemical state of carbon fiber”, Composites: Part A, Vol. 120, pp.33-40 (2019).
- 19) Y. Wan and J. Takahashi, “Tensile and compressive properties of chopped carbon fiber tapes reinforced thermoplastics with different fiber lengths and molding pressures”, Composites: Part A, Vol. 87, pp.271-281 (2016).
- 20) J. Qui, H. Takahata, Y. Huang and Y. Pan, “The relationship between interfacial structure and welding strength of hot plate welding crystalline polymer”, Kobunshi Ronbunshu, Vol. 65, No. 3, pp.235-241 (2008).