研究論文

ランダム配向型熱可塑性 CFRP の 3 点曲げ衝撃試験における
速度依存性・温度依存性の評価と考察矢野 文彬*¹, 松尾 剛*²

(2017 年 11 月 28 日受付)

Evaluation and Investigation of Strain Rate and Temperature Dependence
Using 3-Point Bending Impact Test for Randomly-Oriented Discontinuous
Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic CompositesFumiaki YANO*¹ and Tsuyoshi MATSUO*²

(Received November 28, 2017)

Abstract: Strain rate and temperature dependence of carbon fiber reinforced thermoplastic composites (CFRTP) were evaluated. CFRTP composites are superior not only in terms of specific strength and stiffness, but also in terms of formability. They are, therefore, expected to be widely applied in mass production of automobiles, thereby resulting in significant vehicle-weight reduction. To incorporate CFRTP composites in automobile structures, novel techniques in vehicle-structure design must be developed to ensure safety in the event of collision accidents. It is also necessary to clarify impact properties of the structure under various temperature conditions that an automobile may be subjected to. To this end, the 3-point bending impact test on chopped carbon fiber tape reinforced thermoplastics (CTT) was performed at various operating temperatures. Fracture behavior was also observed using a high-speed video camera, along with investigations concerning strain rate and temperature dependence. Using the abovementioned bending test, the strain rate and temperature dependence of CTT were confirmed in terms of flexural strength, and the fracture behavior was categorized into three failure modes based on temperature conditions. Concurrently, the viscoelastic properties of the matrix resin were evaluated, and the strain rate and temperature dependence of the flexural strength of CTT were predicted using the master curve derived based on the time-temperature superposition principle. The prediction results were found to be consistent with those obtained via experiments.

Key words: Thermoplastic composite, Impact test, 3-point bending test, Strain rate and temperature dependence, Fracture behavior

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、比強度、比剛性に優れる材料として注目され、輸送機の軽量化による燃費向上を目的に使用されている¹⁾。しかし、従来の熱硬化性樹脂をマトリックス樹脂として使用した熱硬化性 CFRP は生産性やリサイクル性に優れず、高コストであ

るため、その適用は航空機や一部の輸送機に留まっている²⁾。そこで、成形性に優れる熱可塑性樹脂をマトリックス樹脂に用いた熱可塑性 CFRP が注目されている^{3,4)}。熱可塑性 CFRP は、熱可塑性樹脂のような高生産性と CFRP の特長である高性能を両立した材料であり、量産車への適応が期待されている⁵⁾。自動車は、砂漠や寒冷地といった様々な温度環境下での走行を想定しなければな

*¹ 株式会社島津製作所分析計測事業部グローバルアプリケーション開発センター(604-8511 京都市中京区西ノ京桑原町1)

Global Application Development Center, Analytical and Measuring Instruments Division, Shimadzu Corporation

*² 東京大学工学系研究科システム創成学専攻

Department of Systems Innovation, School of Engineering, The University of Tokyo

Fig. 1 Illustration of CTT.

らず、また、衝突事故における安全性が確保された設計が行われなければならない。そのため、熱可塑性 CFRP を自動車に適用するためには、使用される温度環境下での衝撃特性を明らかにする必要がある⁶⁻⁸⁾。また、近年では製品開発段階において精度よく性能予測するために CAE 解析が使用されているが、その解析モデルの妥当性を評価するためにも実験データが必要となってくる。

ところで、高分子固体の力学挙動は、温度だけでなく時間にも依存する粘弾性挙動を示し、温度・時間換算則が適用できるといわれている⁹⁾。これは、ある温度で長時間後に起こる現象と同じ力学現象を高温環境下の短時間で再現でき、反対にある温度での短時間の現象と同じ力学現象を低温環境下でのより長時間の現象で再現できるというものである。つまり、長期クリープ試験と同じことを高温下での準静的定速度試験で再現可能であり、高速試験は低温下での準静的定速度試験で再現できる。ここで、クリープ試験と一定ひずみ速度試験において同じ変形・現象が生じるまでの応力履歴を比較すると、クリープ試験において一定応力を与えて経過した時間は、一定ひずみ速度試験においてその応力に到達するまでに要した時間の半分と換算できる^{10,11)}。つまり、この関係を用いると、温度・時間換算則における時間をひずみ速度に置き換えることが可能ということになる。

著者らは前報で炭素繊維テープ強化プラスチック (chopped carbon fiber tape reinforced thermoplastics: CTT) の 3 点曲げ衝撃試験における速度依存性、温度依存性を評価した⁷⁾。この材料は Fig. 1 に示すように炭素繊維に熱可塑性樹脂を含浸して製作したテープ材をランダムに配向した熱可塑性 CFRP である¹²⁾。材料構成については後述する。本研究では衝撃特性と温度特性をさらに詳細に報告する。また、得られた曲げ強度が温度・速度を変数として定量的に予測できることを確認して、熱可塑性 CFRP における温度・時間換算則の適用可能性を示す。さらに高速度ビデオカメラを使用した破壊観察も行い、各温度、各速度における破壊現象の違いを明らかにする。

Fig. 2 Electric-controlled high-cycle testing machine (a) and jig and test specimen (b).

2. 実験

2.1 樹脂単体の粘弾性試験¹¹⁾

マトリックス樹脂 (PP) 単体の粘弾性特性を評価するために、恒温槽付属の高サイクル動的試験機 (MTS AcumenTM 3, MTS) を使用した。試験の様子を Fig. 2(a) に示す。試験片は射出成形により作製したもので、試験片は金型温度 100°C の条件で射出成形により作製した。サイズは、平行部の厚さ、幅はそれぞれ 3.96 mm と 9.9 mm である。Fig. 2(b) に試験片取付け時の様子を示す。材料の温度を正確に制御するために熱伝対を直接試験片に貼り付けた。また、精度よく動的ひずみを測定するために、標点間距離 50 mm の伸び計を使用した。ひずみ振幅の周波数は 0.01~10 Hz をログスケールで 15 分割した 16 条件で、温度条件は、-35 から 150°C まで 5°C ずつ段階的に上昇させた。それぞれの周波数・温度において、PP 単体の線形性が担保される微小ひずみ範囲の特性を得るために、試験片には振幅 0.25 mm のサイン波で負荷を与え、ひずみ振幅 ϵ_0 、応力振幅 σ_0 、および両者の位相差 δ を測定した。貯蔵弾性率 E'_m は、式(1)のような角速度 ω と温度 T_i に関する関数で表される。緩和弾性率 $E_m(t, T)$ とひずみ速度 R を考慮した弾性率 $E_m(R, T_i)$ は、式(2)、式(3)に示すように計算される。すなわち、ある温度 T_i における時間 t 後の緩和弾性率 E_m は式(2)を用いて、ある温度 T_i における、ひずみ速度 R で変形させたときの弾性率は式(3)を用いて表される。これによって、樹脂単体の温度、時間、速度に依存する弾性率の変化を測定できる。

$$E'_m(\omega, T_i) = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cdot \cos \delta \Big|_{\omega, T_i} \quad (1)$$

Table 1 Specimen information.

Specimen	Size [mm]	Matrix	CF	V_f
CTT	50×120×4	Polypropylene	TR50	50%

Fig. 3 Static testing machine (a) and jig (b).

$$E_m(t, T_i) \cong E_m'(\omega, T_i) \Big|_{\omega \rightarrow \frac{2}{\pi \cdot t}} \quad (2)$$

$$E_m(R, T_i) \cong E_m'(\omega, T_i) \Big|_{\omega \rightarrow \frac{R}{\varepsilon_0}} \quad (3)$$

2.2 3点曲げ試験

本研究で扱ったCTTは、マトリックス樹脂にポリプロピレン、炭素繊維に三菱ケミカル製のTR50を使用しており、繊維の含有率は50%である。実験に用いたCTT平板はスタンピング成形によって製造されたものである。IRヒーターを用いて融点よりも十分に高い温度まで外部加熱して、PPを溶融させた後に、金型温度130°Cの条件で2分間加圧下で冷却・固化して作製した。試験片の情報をTable 1に示す。

試験には、精密万能試験機 (AG-Xplus, 島津製作所) と高速パンクチャー衝撃試験機 (HITS-P10, 島津製作所) を使用した。試験速度が低速の場合は精密万能試験機を、試験速度が高速の場合は高速パンクチャー試験機を使用し、試験速度によって使い分けた。Fig. 3に精密万能試験機の全体の様子(a)と治具の写真(b)を示す。付属の恒温槽を使用して任意の一定温度環境下での試験が可能となる。Fig. 3(b)のかご形治具に3点曲げ治具を取り付けることで、試験を実施した。槽内で試験を行う場合、試験機クロスヘッドから試験治具までの距離が長くなるため、そのまま圧縮方向に試験を行うとロッドが座屈する可能性がある。かご形治具を使用すると、クロスヘッドを引張方向に移動させたときに、試験片に圧縮方向 (曲げ方向) に負荷を与えられるため、ロッドの座屈

Fig. 4 Dynamic testing machine(a) and jig and test specimen(b).

Fig. 5 Principle of high speed impact testing machine.

なしに試験することができる。

Fig. 4に高速パンクチャー衝撃試験機(a)とその治具(b)の写真を示す。高速パンクチャー衝撃試験機(HITS-P10, 島津製作所製)は、最大20 m/sで試験可能であり、本来は打ち抜き試験専用の装置である。この装置に3点曲げ衝撃試験治具を取り付けることで試験を行った。また、付属の恒温槽は-40°Cから150°Cまで調節可能であり、自動車の使用温度環境下での評価が可能である。HITS-P10の原理図をFig. 5に示す。Fig. 5に示すように油圧源から送られた油は一度アキュムレータに蓄えられ、サーボ弁によりピストンの速度をコントロールすることが可能である。このように油圧で試験速度をコントロールすることができるため、一般的な落錘試験機と比較して、試験中の速度減衰が小さいという特徴がある。

Table 2 Test condition.

Specimen	CTT
Temperature [°C]	-30, 0, 25, 50, 75, 100
Strain rate [/s]	0.0002 (AG-Xplus) (5 mm/min) 0.01, 0.1, 1, 10 (HITS-P10) (0.0025~2.5 m/s)
Span [mm]	80

3点曲げ衝撃試験治具は、CFRPの3点曲げ衝撃試験規格である「JIS K7084 炭素繊維強化プラスチックの3点曲げ衝撃試験方法」を参考に圧子は半径5 mm、支点は半径2 mmとした¹³⁾。衝撃試験の測定において、精度の高い信号を抽出するためには、振動ノイズの低減が重要であり、振動ノイズの低減には計測系の共振点を高くすることが重要である。そこで、治具を軽量化するために¹⁴⁾、今回は圧子をアルミ合金で作製し、さらに圧子の初期の衝撃により、試験片が飛散または位置ずれしないように、支点側にばね機構を設けて回転自由の支持構造とした⁶⁾。試験機の正面前方には、高速度ビデオカメラ (FASTCAM SA-X, フォトロン製) とメタルハライド照明2台を設置し、試験片側面の衝撃破壊の様子を高速度撮影した。

試験温度は、自動車の使用環境温度を参考に、-30, 0, 25(常温), 50, 75, 100°Cの6水準とした。CTTはFig. 1のように比較的サイズの大きいテープ材をランダムに配向しているため、試験結果にばらつきが生じやすい。その影響を小さくするために、支点間距離と試験片寸法を規格の規定値以上に設定した。具体的には、支点間距離80 mm、試験片の幅50 mm、厚さ4 mmとした。試験速度も実際の使用状況を考慮して、ひずみ速度の範囲を決定した。ただし、試験の実速度が大きくなると、試験力の振動ノイズが大きくなるため、最大のひずみ速度は10/sとした。衝撃試験による振動ノイズはローパスフィルターを使用して極力除いている。ひずみ速度0.0002/sのみ精密万能試験機を使用し、それ以外のひずみ速度では高速パンクチャー衝撃試験機を使用した。試験条件の詳細をTable 2に示す。

3. 結果と考察

3.1 曲げ強度・弾性率の速度・温度依存性

前章の条件に基づき、CTTの3点曲げ試験を実施した。常温における各ひずみ速度の3点曲げ衝撃試験結果の一例をFig. 6に示す。試験片のランダム性によるば

Fig. 6 Stress-strain curves at room temperature.

Fig. 7 Stress-strain curves of strain rate 1/s.

Fig. 8 Relation between flexural strength and strain rate.

つきの影響があるため、応力値に多少誤差があるものの、試験速度が小さいほど曲げ強度が小さく、反対に試験速度が大きいと曲げ強度も大きいという傾向がある。また、ひずみ1%以下でグラフの傾きの差はほとんどない。つまり、この速度範囲では曲げ弾性率の速度依存性はほとんど確認できないといえる。

次に、ひずみ速度1/sにおける各温度の3点曲げ衝撃

Fig. 9 Relationship between flexural strength and strain rate at every temperature.

試験例を Fig. 7 に示す。こちらも試験片のばらつきの影響があるため、多少誤差はあるが、低温ほど曲げ強度が大きく、高温ほど曲げ強度が小さくなっている。しかし、曲げ弾性率に関しては、グラフの傾きが低温のほうが大きく、高温のほうが小さくなる傾向があるものの、後述するように、試験片によるばらつきまで考慮すると明確なものではない。

Fig. 8 にひずみ速度に対する曲げ強度の関係を示す。ここでグラフ中のプロットは3つの試験片の平均値を示す。Fig. 8 より低温ほど曲げ強度が大きくなる傾向があることが確認された。また、Fig. 9 にそれぞれの温度条件におけるひずみ速度に対する曲げ強度の関係を示す。ここで、エラーバーは標準偏差を示す。これより、25～100°C においては、比較的ばらつきが小さく速度依存

Fig. 10 Relation between elastic modulus and strain rate.

性が確認された。しかし、0～30℃においては、明確な速度依存性は確認されず、ばらつきも大きいという結果となった。ここで、ひずみ速度 10/s において、曲げ強度が低くなる傾向が確認される。これは、速度が上がったことによって、圧子衝突時の反発運動が大きくなり、試験波形に装置系の振動が生じたことが原因であると考えられる。この振動の半波長と最大試験力に到達するまでの時間が近づき、ちょうど最大試験力と波形の低下する部分が重なったため、見かけ上の最大試験力が小さくなったと考えられる。装置系の改良は今後の課題である。同様に Fig. 10 にひずみ速度に対する曲げ弾性率の関係を示す。曲げ弾性率に関しては、低温のほうが大きく、高温のほうが小さくなる傾向が確認されたが、必ずしも明確とは言えない。Fig. 11 にそれぞれの温度条件における曲げ弾性率とひずみ速度の関係を示す。Fig. 11 よりすべての温度条件で明確な速度依存性は確認されず、試験片のばらつきによる誤差のほうが大きいという結果となった。

3.2 破壊現象の観察

前節の曲げ応力-ひずみ線図をそれぞれ確認すると、低温、常温付近、高温でグラフの傾向が異なっており、大きく 3 つに分類することができる。Fig. 12 に代表的な曲げ応力-ひずみ線図を示す。Fig. 12 の -30℃、10/s における曲げ応力-ひずみ線図は、曲げ応力が最大点に到達後、瞬時に大きく低下している。一方、100℃、0.01/s における曲げ応力-ひずみ線図は、曲げ応力が最大点に到達後、緩やかに低下している。また、25℃(常温)、1/s における曲げ応力-ひずみ線図は、低温同様に曲げ応力が最大点到達後、瞬時に低下しているが、低下量は低温ほど小さくなく、その後断続的に緩やかな低下と瞬間的な

大きな低下を繰り返している。常温においては、試験の様子の高速度撮影を行っており、その一例を Fig. 13 に示す。Fig. 13 の曲げ応力-ひずみ線図は Fig. 12 の 25℃、1/s と同一のものであり、グラフ中の番号における圧子直下の様子を画像(1)～(8)に示す。画像(1)において圧子と試験片が接触し、画像(2)において曲げ強度は最大点に到達する。この間、画像上では試験片に損傷は確認されない。その後、画像(3)にて圧子直下の右側近傍の圧縮側にて破壊が確認された。この瞬間わずかな試験力の低下が確認された。続いて、画像(4)において引張側にて破壊が確認された。この瞬間もわずかな試験力の低下が確認された。画像(5)においても引張側にて破壊が確認されたが、画像(4)とは異なり、複数のテープ片が一気に破壊している。その結果、(4)における試験力の低下量よりも大きく試験力が低下している。画像(6)においては圧縮側から引張側にかけて白矢印で示すようにき裂が発生している。この瞬間もグラフ上ではわずかな試験力の低下が確認できた。画像(7)では画像(5)で発生したき裂がさらに引張側に進展している。グラフ上ではき裂の進展に合わせて緩やかに試験力が低下している。画像(8)においてもさらにき裂が進展している。つまり、引張側または圧縮側で破壊が瞬時に進んだときにグラフ上では瞬時の試験力の低下が確認され、圧縮側から引張側にかけてき裂が徐々に進展していく過程で、グラフ上では緩やかな試験力の低下が確認できると考えられる。

次に、Fig. 14 に代表的な試験後の試験片の写真を示す。(a)、(b)、(c)はそれぞれ -30℃(10/s)、25℃(1/s)、100℃(0.01/s)で試験を行ったものであり、それぞれ Fig. 12 の 3 つのカーブに対応している。(a)では圧子直下の圧縮破壊だけでなく、広い範囲で層間剝離が生じている。このような現象は -30℃および 0℃で多く確認された。Fig. 12 の -30℃におけるグラフの波形と照らし合わせると、層間剝離が生じると曲げ応力が大きく低下すると考えられる。(b)のように圧縮側から引張側にかけて板厚全域で破壊が生じているものは、25℃および 50℃の条件下で確認された。Fig. 13 で示したように圧縮側および引張側での瞬時の破壊や圧縮側から引張側へのき裂の進展が組み合わさり、表面から内部までの板厚全域での破壊が生じている。(c)では圧縮側にのみ破壊が確認され、引張側では損傷は確認されなかった。(c)のように圧縮側で主に破壊が集中しており引張側での損傷が小さいものは 75℃および 100℃の条件下で確認された。Fig. 12 の 100℃におけるグラフの波形と照らし合わせると圧縮破壊が生じるとグラフ初期のピークが現れ、その後

Fig. 11 Relationship between elastic modulus and strain rate at every temperature.

の曲げ変形に伴う圧縮破壊が進展していくに従い、緩やかに曲げ応力が低下していると考えられる。条件によってはある程度の引張破壊が確認されることもあった。

以上のように、曲げ応力-ひずみ線図や試験後の試験片からCTTの破壊モードを分類すると大きく3つに分類できると考えられる。1つ目は、低温での「圧縮破壊に伴う広域の層間剥離」で、曲げ応力は瞬時に大規模に低

下する。2つ目は常温付近での「圧子付近での局所的な圧縮および引張破壊」で、曲げ応力は瞬時に低下する局面が断続的に存在する。3つ目は高温条件下での「圧子直下の圧縮破壊」で曲げ応力は曲げ変形とともに緩やかに低下する。この分類をFig. 8の曲げ応力-ひずみ線図に反映させると、Fig. 15のように主に温度により3つに分類することができる。

Fig. 12 Flexural stress-flexural strain curve.

3.3 曲げ強度に対する時間温度換算則の適用性

本節では、CTT の曲げ強度の温度・速度依存性を、マトリックスの粘弾性特性により導出したマスター曲線から時間温度換算則 (TTSP) を利用して予測できるか、その適用性について論じる。このとき、Fig. 12 などから CTT の曲げ挙動は最大応力までほぼ線形挙動を示すことから、マトリックスである PP そのものの非線形性の影響は CTT のマクロな挙動に対してほとんど無視できるものとする。

Fig. 16 に、2.1 節で試験方法を述べた樹脂単体の動的粘弾性試験の結果を示す。横軸を経過時間 t ，縦軸を緩

Fig. 13 Flexural stress-flexural strain curve and failure propagation images by high-speed video camera.

Fig. 14 Specimen after testing. (a) Low temperature and high strain rate (-30°C , $10/\text{s}$). (b) Room temperature (25°C , $1/\text{s}$). (c) High temperature and low strain rate (100°C , $0.01/\text{s}$).

Fig. 15 Classification of failure modes dependent on strain rate and temperature.

Fig. 16 Relaxation modulus of PP by dynamic mechanical test.

和弾性率 E_m として、温度条件毎に計測値をプロットしている。この結果を元に、基準温度 T_0 を 0°C として、各温度水準のプロットを時間軸方法にシフトさせて、滑らかな曲線を描くように作成したマスターカーブを Fig. 17 に示す。横軸はシフトした経過時間 t' を表す。これより温度 T と時間シフト量 $\log a_{T_0}(T)$ の関係が Fig. 18 のように得られ、文献 15), 16) を参考にアレニウス式を採用して次式で表される。

$$\log a_{T_0}(T) = \frac{\Delta H_1}{2.303 \cdot G} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \cdot H(T_g - T) + \left[\frac{\Delta H_1}{2.303 \cdot G} \cdot \left(\frac{1}{T_g} - \frac{1}{T_0} \right) + \frac{\Delta H_2}{2.303 \cdot G} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_g} \right) \right] \cdot (1 - H(T_g - T)) \quad (4)$$

ここで、 G はガス定数であり、 $G = 8.314 \times 10^{-3} [\text{kJ}/(\text{K} \cdot \text{mol})]$ 、 ΔH_1 および ΔH_2 は、ガラス転移点温度 T_g ($= T_0 = 0^\circ\text{C}$ とする) 以下と T_g 以上のそれぞれ活性化エネルギー、 H はヘヴィサイド関数を表す。Fig. 18 に示す換算関係曲線から、 ΔH_1 および ΔH_2 はそれぞれ 215 kJ/mol 、 352 kJ/mol と導かれる。一方、経過時間 t とマスター曲線上の経過時間 t' は以下の関係を示すことから、

$$a_{T_0}(T) = \frac{t}{t'} \quad (5)$$

緩和弾性率 E_m は、時間と温度の関係式として以下のよう導出できる。

$$\log E_m(\log t, T) = \log E_m(\log t', T_0) = \log E_m(\log t - \log a_{T_0}(T), T_0) \quad (6)$$

すなわち式 (4) と (6) から、任意の経過時間 t および一定温度条件下 T における緩和弾性率 E_m を、Fig. 17 のマスター曲線上の一意の点として決定できる。

ここで式 (5) は、同じ現象が起きるまでの時間が、実時間では t 経過し、マスター化された基準温度条件下では t' 経過することを意味する⁹⁾。したがって、一定ひずみ速度条件下では、破壊するまで同じ変形が起きる際の速度

Fig. 17 Master curve construction for relaxation modulus of PP.

Fig. 18 Time-temperature shift factor based on the Arrhenius equation.

を、実ひずみ速度で R ，マスター化された基準温度条件下でのひずみ速度を R' とすると，

$$\frac{R'}{R} = \frac{t}{t'} = a_{T_0}(T) \quad (7)$$

と変換できる．また，Nakada ら¹⁰⁾，Matsuo ら¹¹⁾ や Christensen¹⁷⁾ の文献を参考にすると，あるひずみ速度 R' における緩和弾性率は，ある時間 t' 経過後の緩和弾性率と以下に示す変換式で等しいことがわかっている．

$$\log R' = \log \frac{2 \cdot \epsilon_0}{\pi} - \log t' \quad (8)$$

ここで， ϵ_0 は，動的粘弾性試験において一定に制御したひずみ振幅を示す．つまり，次式が成立する．

$$\log E_m(\log R, T) = \log E_m(\log R', T_0) \quad (9)$$

$$= \log E_m \left(\log \frac{2 \cdot \epsilon_0}{\pi} - \log t', T_0 \right)$$

これは，任意のひずみ速度 R および温度 T における弾性率 E_m は，基準温度を T_0 として導出したマスター曲線上の式(7)でシフトされたひずみ速度 R' における弾性率 E_m に等しく，このひずみ速度 R' を式(8)に示すとおり緩和時間 t' に置き換えて，Fig. 17 の関係曲線から求めた弾性率 E_m と等価である，ということの意味する．

一方，前節で現象を明らかにしたとおり，CTT の曲げ強度が全て圧縮破壊を起点として決定されるため，圧縮強度が繊維強化方向せん断弾性率に支配的であるとする Rosen¹⁸⁾ の理論から，曲げ強度の温度・速度依存関係は，一方向材の繊維方向曲げ強度と同じく^{10,11)}，次式のようにマトリックス樹脂の弾性率比を用いて予測できると仮定する．

$$\frac{\sigma_f(R, T)}{\sigma_{f0}(R_0, T_0)} = \left[\frac{E_m(R, T)}{E_m(R_0, T_0)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

すなわち，任意のひずみ速度 R および温度 T のときの曲げ強度 $\sigma_f(R, T)$ と，基準速度 R_0 および基準温度 T_0 のときの曲げ強度 $\sigma_{f0}(R_0, T_0)$ の比 (左辺) は，同じひずみ速度と温度のときのマトリックスの弾性率 $E_m(R, T)$ の，同じく基準条件下での弾性率 $E_m(R_0, T_0)$ に対する比の平方根 (右辺) と等価である^{11,19)}．式(9)および(10)から以下のように，温度依存・速度依存を考慮した，曲げ強度の予測式が導かれる．

$$\begin{aligned} \log \sigma_f(\log R, T) &= \log \sigma_f(\log R', T_0) \\ &= \log \sigma_{f0}(\log R_0, T_0) + \frac{1}{2} \\ &\quad \times [\log E_m(\log R', T_0) \\ &\quad - \log E_m(\log R_0, T_0)] \end{aligned} \quad (11)$$

基準速度 R_0 を静的曲げ試験におけるひずみ速度 $R_0 =$

Fig. 19 Predicted master curve for flexural strength of CTT.

Fig. 20 Comparison of the predicted strength with the experimental data dependent on temperature and strain-rate.

1.8×10^{-5} [1/s] とすると，基準温度 $T_0 = 0^\circ\text{C}$ 時のマトリックスの弾性率 E_m は，式(8)と Fig. 17 より， $E_m(R_0, T_0) = 2.87$ GPa と割り出せる．一方，基準速度・基準温度での CTT の曲げ強度 σ_{f0} は，3.1 節の実験結果より $\sigma_{f0}(R_0, T_0) = 505$ MPa とわかっているため，基準温度 $T_0 = 0^\circ\text{C}$ のときのひずみ速度 R' に対する曲げ強度のマスター曲線は，式(9)と(11)および Fig. 17 から，Fig. 19 (両対数グラフ) に示すように予測できる．よって，このマスター曲線から，式(4)，(7)を用いて実速度・実温度条件下における曲げ強度に変換すると，Fig. 20 に示す温度毎の理論関係曲線が得られる．また，前節の実験結果を同グラフ上にプロットで全て示す．実験と予測曲線を比較すると，特に温度に大きく依存して曲げ強度が変化する傾向を，TTSP による予測曲線で説明できることがわかる．また，ひずみ速度の依存性も，速度が速くなるとやや強度が上がっていく様子が予測曲線と傾向が一致した．高速では実験データが若干ばらついてはいるが，低速側では実験データが安定しているために，予測曲線が上手く実

験結果を再現している。以上より、不連続繊維がランダムに配向した繊維強化プラスチック複合材料において、その曲げ強度の速度依存性および温度依存性は、マトリックスの粘弾性特性により導出した時間温度換算関係によって定量的に説明できることが示唆された。

4. 結 言

ランダム配向型の熱可塑性CFRPの3点曲げ衝撃試験を行い、速度依存性、温度依存性に関して評価した。さらに、高速度カメラを使用した破壊観察、試験後の試験片の破面観察、グラフの傾向の違いから、CTTの破壊挙動を大きく3つに分類した。破壊モードは、それぞれ低温での「圧縮破壊を伴う広域の層間剥離」、常温付近での「圧子付近での局所的な圧縮および引張破壊」、高温での「圧子直下の圧縮破壊」となり、主に温度条件によって分類されることがわかった。また、マトリックス樹脂の粘弾性特性により導出したマスター曲線から時間温度換算則を利用してCTTの曲げ強度の速度依存性、温度依存性を予測できるか検討した。実験結果を予測曲線にプロットすると、多少の実験データのばらつきはあるものの、傾向としては合っており、CTTの曲げ強度をマトリックス樹脂の粘弾性特性により導出した時間温度換算関係と結び付けて定量的に解釈できることが示唆された。

本研究は、経済産業省蔵-NEDOプロジェクト「革新的新構造材料等研究開発」(平成26年度～)の一環として行われたものです。特に材料を提供いただいた東洋紡株式会社に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 山下慎一郎, 大澤 勇, 松尾 剛, 張 昕, 高橋 淳: 日本複合材料学会誌, **39**, 6 (2013), 221-230.
- 2) 菅沼啓史, 山下慎一郎, 大澤 勇, 高橋 淳: 日本複合材料学会誌, **43**, 1 (2017), 18-24.
- 3) 長塚 渉, 松尾 剛, 矢野文彬, 高橋 淳: 日本複合材料学会誌, **42**, 1 (2016), 23-33.
- 4) 住山琢哉, 松尾 剛, 菅 満春, 古市謙次, 野々村千里: 日本複合材料学会誌, **43**, 4 (2017), 149-159.
- 5) 松尾 剛, 菅 満春, 古川健一, 住山琢哉, 榎本 弘, 坂口圭祐: 自動車技術会論文集, **48**, 2 (2017), 549-554.
- 6) 矢野文彬, 長塚 渉, 松尾 剛: 第39回複合材料シンポジウム講演要旨集 (2014), pp. 153-154.
- 7) 矢野文彬, 松尾 剛, 長塚 渉: 第7回複合材料会議予稿 (2016), 1A-20.
- 8) F. Yano, W. Nagatsuka & T. Matsuo: Proc. 20th International Conference on Composite Materials (2015), pp. 3220-3224.
- 9) 國尾 武: 材料システム, **6** (1987), 7-19.
- 10) M. Nakada & Y. Miyano: *J. Compos. Mater.*, **47**, 15, 1897-1906.
- 11) T. Matsuo, M. Nakada & K. Kageyama: *J. Compos. Mater.*, **52**, 6 (2018), 793-805.
- 12) NEDO, サステナブルハイパーコンポジット技術の開発, 20130000000767 (2013).
- 13) JIS K 7084 炭素繊維強化プラスチックの3点曲げ衝撃試験方法 (1993), 日本工業規格.
- 14) 株式会社産業技術サービスセンター: 最新 材料の性能・評価技術 (2014), pp. 157-161.
- 15) V. Djokovic, D. Kostoski & M.D. Dramicanin: *J. Polym. Sci. B*, **38** (2000), 3239-3246.
- 16) F.J. Wortmann & K.V. Schulz: *Polymer*, **36**, 2 (1995), 315-321.
- 17) R.M. Christensen: *The Theory of Viscoelasticity: An Introduction*, Academic Press, New York (1982).
- 18) B.W. Rosen: *Fiber Composite Materials*, American Society of Metals, Metals Park (1965), pp. 37-75.
- 19) N.F. Dow & I.J. Gruntfest: *Space Sciences Laboratory Structures and Dynamics Operation*, T.I.S. R60SD389 (1960).