

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420022

研究課題名(和文) 熱可塑性CFRP積層板のせん断切断機構の解明と最適化

研究課題名(英文) Investigation of shear cutting mechanism and its optimization of thermoplastic CFRP laminates

研究代表者

黄木 景二 (OGI, Keiji)

愛媛大学・理工学研究科・教授

研究者番号：70281194

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：熱可塑性樹脂からなる炭素繊維プラスチック(以下、CFRP)積層板のせん断切断挙動メカニズムを実験および粒子法による数値解析を通して解明するとともに、温度・クリアランス・刃の形状などの切断条件の最適化を行い、以下の知見が得られた：  
熱硬化性CFRPと異なり、層間はく離の発生はほとんどみられず、バリと樹脂割れが主な加工損傷となった。ガラス転移温度付近で加熱することによって、切断荷重が低下する一方で、樹脂のじん性が増加するため、低加工損傷のせん断切断が実現できることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In this study, shear cutting mechanism of carbon fiber reinforced thermoplastic (CFRP) laminates was clarified through experiment and numerical analysis using a particle method. In addition, shear cutting conditions such as temperature, clearance and cutting blade geometry were optimized. The main result obtained from the above study is as follows: Burrs and matrix cracking are the dominant machining damages while delamination is little observed unlike thermosetting CFRP laminates. Shear cutting with low-machining damage is realized at around the glass transition temperature because shear load required for cutting is decreased and the toughness of the resin increases.

研究分野：複合材料工学

キーワード：損傷力学 熱可塑性CFRP せん断切断

1. 研究開始当初の背景

(1) 自動車の軽量化は燃費の向上や高効率化につながる重要な課題の一つである。そこで、軽量で高強度な炭素繊維強化プラスチック複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastics; CFRP) を自動車部材として使用すれば、大幅な軽量化が実現され、今後 CFRP の適用が増大すると期待される。

(2) 切断の従来技術としてウォータージェット、レーザー、ワイヤ放電などが挙げられるが、加工時間が最大で数 10 分程度かかるため、自動車部材には向かない。そこでせん断切断が可能になれば、プレス成形後、数秒でトリミングが完了し、リードタイムを短くできると期待される。近年、リサイクル性が求められる自動車用 CFRP は熱可塑性樹脂を用いる必要があるため、熱可塑性 CFRP のせん断切断技術を確立する必要がある。

2. 研究の目的

(1) 熱可塑性 CFRP 積層板のせん断による切断機構を解明し、最適切断技術を確立することを研究の目的とする。具体的な目的は下記の 3 つである。

(2) 熱可塑性 CFRP 積層板 (厚さ 1~3 mm) のせん断切断機構および切断に伴う損傷挙動を実験的に解明する。変形、切断、損傷挙動などのせん断切断過程を明らかにするとともに、切断後の切断損傷を光学的手法および非破壊検査 (軟 X 線) によって定量的に明らかにする。

(3) 有限要素法 (FEM) と粒子法を用いたマルチスケール切断シミュレーションを行い、数値的にせん断切断挙動を再現する。

(4) せん断切断を支配する材料パラメータ、幾何学的パラメータおよび温度条件を整理し、最適切断条件を導き出す。

3. 研究の方法

(1) 切断試験

切断試験システムの構築：せん断切断時の試験片の変形と損傷の過程を明らかにするために、高速度カメラを用いてせん断切断挙動をその場観察する試験システムを構築した。切断治具はクリアランス、上刃形状 (シャープ角、刃先角)、試験片厚さを可変できる。下刃治具に挿入された棒状ヒーターによって、試験片温度を上昇させた。万能試験機を用いてせん断荷重 変位データを測定した。また同様仕様の穿孔用治具も作製し、穿孔切断試験を実施した。さらに、比較のため 130 硬化型熱硬化性 CFRP についても上記の実験を行った。

切断損傷の定量評価法の確立：上記試験システムで得られたバリおよび加工損傷 (樹脂割れと層間はく離) について、主として光学顕微鏡、軟 X 線撮影装置を用いて、定量的かつ非破壊的に評価した。

(2) 数値切断シミュレーション

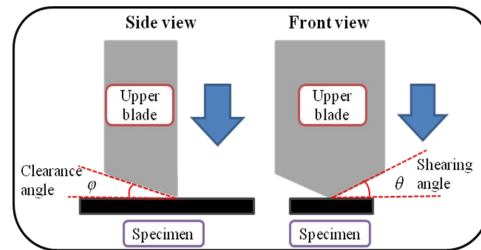


図 1 切断刃の形状パラメータ

FEM 解析による切断シミュレーション：層間に接着要素を挿入して、面外荷重による層間にはく離とプライの破断を FEM によってシミュレーションした。しかし、切断のように大変形し、かつ要素が完全に分離する現象は FEM 解析のみでは再現性に限界があるため、詳細な解析は次の粒子法によって行った。

粒子法による切断シミュレーション：SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いて切断現象を再現した。流体同様、質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則を支配方程式として使い、異方性固体としての構成則と人工粘性を加味した。

(3) 切断条件の最適化：種々の検討の結果、せん断切断を支配するパラメータとして、材料の成形圧力、切断温度、クリアランス、刃の形状 (シャープ角と刃先角、図 1 参照)、加工角度 (切断線と繊維方向との角度) を選択した。また積層構成として、一方向積層板と直交積層板を選んだ。なお、切断速度の影響は小さいためこれを一定とした。

4. 研究成果

(1) 加工損傷評価

図 2 に切断面中央部 (中間断面) と切断面の凹凸部面積の評価例を示す。切断面中央部と直交する面を切断後研磨し、光学顕微鏡を用いて微視的な損傷を観察した。ここで切断面からスクラップ側に出る突起をバリ、製品側に出る欠落及びき裂をワレと定義し、各層のバリとワレの長さの最大値と平均値を測定し、定量的に断面形状すなわ

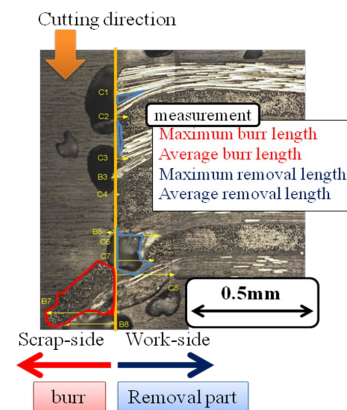


図 2 切断面近傍の加工損傷例

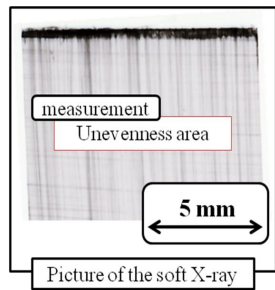


図3 軟X写真による加工損傷の様子

ち加工品位を評価した。また図3に示すように、軟X線写真からは画像解析ソフトを用いて内部損傷面積を測定した。

ここで、熱硬化性CFRPの場合、内部損傷のほとんどの領域は層間はく離からなるが、熱可塑性CFRPでは、樹脂のじん性が高いため、初期の予想とは異なり、層間はく離がほとんど観察されなかった。そのため、バリとワレ（欠損部）による凹凸部の面積を内部損傷面積と定義した。

#### (2) 温度の効果

図4に切断温度 $T$ と切断せん断強度(最大せん断荷重/切断面積)  $\tau_{max}$  の関係を示す。 $T$ が高いほど  $\tau_{max}$  が小さくなる傾向にある。特に、ガラス転移点 $T_g$ 近傍に近づくにつれ、 $\tau_{max}$  の低下が顕著である。これは $T_g$ で樹脂が軟化し、切断に必要な面外せん断強度が低下したためであると推測される。また45°Cで特異的に  $\tau_{max}$  が減少している。すなわち、 $T_g$ 近傍で剛性と切断せん断強度が低下した。またこの積層構成では45°において最も加工品位が高かった(図省略)。これはこの温度前後で、モードIIのじん性(ENF試験により測定)が急激に増加し、損傷モードが変化したためであると推測される。ほぼ同様の切断せん断強度の温度依存性は熱硬化性CFRP積層板でも見られたが、この場合、 $T_g$ が約90°であり、最適切断温度はより高い。

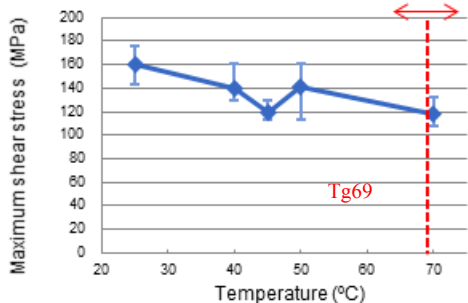


図4 切断せん断強度の温度依存性 (クロスプライ積層板)

#### (3) 加工角度と成形圧力の効果

図5に成形圧力 $P$ と  $\tau_{max}$  の関係を示す。加工角度  $\theta = 0^\circ$  において、 $P$ が高いほど

$\tau_{max}$  が小さくなる傾向がある。これは、プレス成形時の樹脂の流出の影響で、炭素繊維の束の密度が高くき裂が発生しやすく、試験片の強度低下を起こしたためと考えられる。中間断面のバリとワレの長さ、全体の切断面の加工品位が高いことが判明した(図省略)。

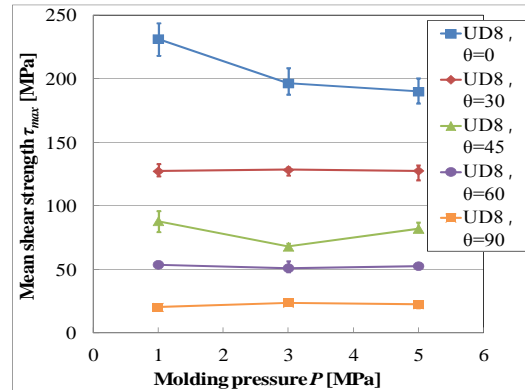


図5 切断せん断強度の加工角度・成形圧力依存性 (一方向積層板)

#### (4) クリアランスの効果

図6にクリアランス $c$ と  $\tau_{max}$  の関係を示す。このグラフから、加工角度が小さい範囲では、 $c = 0.01\text{mm} \sim 0.05\text{mm}$  までにかけて  $c$  が大きくなるほど、 $\tau_{max}$  は低下する。 $c = 0.05\text{mm}$  以降ではほぼ横ばいになる。そのため、 $c = 0.01\text{mm} \sim 0.05\text{mm}$  の範囲で閾値  $c_{th}$  が存在すると考えられる。 $c < c_{th}$  が大きくなると純せん断破壊から曲げ破壊に遷移し、せん断破壊に必要な応力が低下するが、 $c > c_{th}$  ではクリアランス部でのせん断変形が支配的になり、曲げ応力の効果が低下するためであると推測される。

中間断面のバリとワレの長さ、全体の切断面の凹凸部面積の評価から  $c = 0.01\text{mm}$  の場合、ワレが少ない良好な加工品位が得られるため最適なクリアランスである(図省略)。

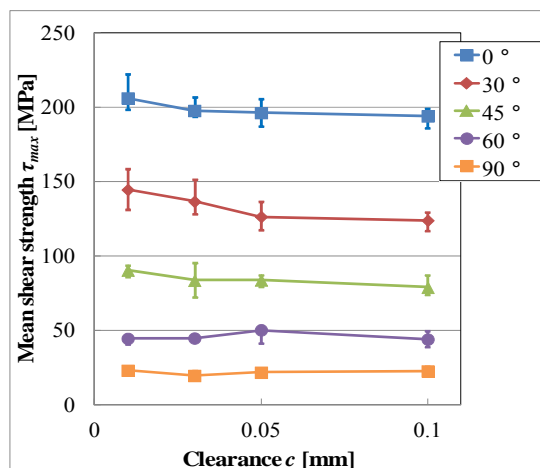


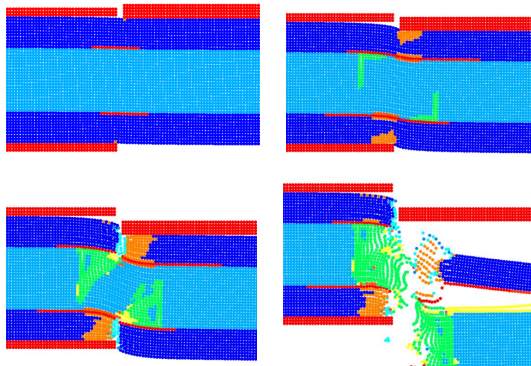
図6 切断せん断強度の加工角度・クリアランス依存性 (一方向積層板)

### (5) 粒子法解析結果

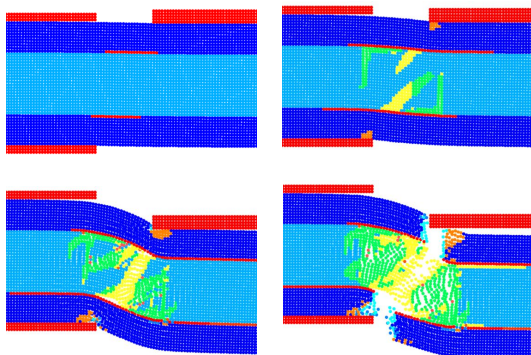
図7にクロスプライ積層板について、粒子法(SPH法)による切断過程のシミュレーション結果の一例を示す。この解析は熱硬化性CFRP積層板の結果であり、熱可塑性CFRP積層板では層間はく離が生じにくい点に留意する必要がある。

クリアランス(上刃と下刃の間隔)の大きさに依存せず、破壊プロセスはおおよそ、層間はく離、樹脂割れ、繊維破断の順に起こるが、クリアランスが小さい場合、クリアランス部分での変形量は比較的小さく、せん断応力による破壊が支配的になる。また0度層は圧縮応力による破壊が主である。一方、クリアランスが大きい場合、曲げ応力の成分が顕在化し、クリアランス部分で大きな曲げせん断カップリング変形が生じた後、破断する。0度層は主に引張応力により最終破断する。結果的に、クリアランスが大きいほど加工損傷規模が大きく、切断面の加工品位も低い傾向がある。ただし、前述のように、クリアランスがあまりに小さいと、切断に要する荷重が増加し、工具寿命の低下につながる。

なお、上記の変形の様子は高速カメラ撮影の様子とよく一致している。



(a) クリアランスが小さい場合



(b) クリアランスが大きい場合

図7 粒子法による切断過程シミュレーション

### (6) 結論

以上より以下の結論が得られた:

熱可塑性CFRP積層板では、ガラス転移点(70 )近傍で切断すると切断荷重は低下するが、最適切断温度はじん性が増加し始める45 付近である。一方、熱硬化性CFRP積層板

ではガラス転移点(90 )近傍が最適温度である。

成形圧力が高い場合、炭素繊維の束の密度が高く、界面が密集し強度が低下する。その結果、スクラップが厚さ方向に引張られて、ダレ変形によるき裂が製品側の内部まで拡大する。

クリアランスを大きくすると、せん断加工から曲げ加工に遷移するため、破壊に必要なせん断応力は低下するが、切断面でダレ変形に起因するき裂が増大する。クリアランスを小さくすると、せん断切断に必要な応力が高くなるが、それに伴う内部き裂は抑制される。

最適案成形圧力は1MPa、クリアランスは0.01mmがである。

粒子法解析により、せん断切断に寄与する応力と切断メカニズムが解明された。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

松田 伸也, 黄木 景二, 矢代 茂樹, 熱硬化性CFRP積層板のパンチプレス加工による穿孔の特徴と加工品質, 日本複合材料学会誌, 査読有, Vol.42, 2016, pp.13-22.

S. Ueshiba, K. Ogi, Y. Shigematsu and K. Saito, Characterization of machining damages generated by a piercing process in CFRP laminates, Key Engineering Materials, 査読有, Vols. 656-657, 2015, pp.185-190. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.656-657.185

K. Nakamura, K. Ogi, A. Ota, S. Nakata and K. Suma, Shear cutting processes in thermosetting and thermoplastic CFRP laminates, Key Engineering Materials, 査読有, Vols. 656-657, 2015, pp.347-352. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.656-657.347

〔学会発表〕(計14件)

西本 将士, 黄木 景二, 熱硬化性CFRP積層板のせん断切断挙動に及ぼす切断刃の形状の効果, 日本機械学会中国四国支部第54期総会・講演会, 2016年3月9日, 愛媛大学(愛媛県松山市).

須磨 建太, 黄木 景二, 中村 史哉, CFRTP積層板のせん断加工特性に及ぼす積層構成の効果, 第40回複合材料シンポジウム, 2015年9月18日~19日, 金沢工業大学(石川県野々海市).

K. Ogi, S. Yashiro, S. Nakata and K. Suma, Effect of temperature and clearance on shear cutting behaviors in CFRP laminates, The 20<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials, 2015年7月19日~24日, Copenhagen (Denmark).

西本 将士, 中田 翔, 黄木 景二, 熱硬化性CFRP積層板のせん断切断加工条件の最適

化, 日本機械学会中国四国学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演会, 2015 年 3 月 5 日, 近畿大学工学部 (広島県東広島市).

清水 俊行, 黄木 景二, 植芝 真吾, CFRTP 積層板のパンチプレスによる穿孔加工, 日本機械学会中国四国学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演会, 2015 年 3 月 5 日, 近畿大学工学部 (広島県東広島市).

須磨 建太, 中村 徳子, 黄木 景二, CFRTP 積層板の成形圧力によるせん断加工性, 第 39 回複合材料シンポジウム, 2014 年 9 月 18 日 ~ 19 日, 秋田大学理工学部 (秋田県秋田市).

中田 翔, 黄木 景二, 熱硬化性 CFRP 積層板のせん断加工挙動に及ぼすクリアランスの効果, 第 39 回複合材料シンポジウム, 2014 年 9 月 18 日 ~ 19 日, 秋田大学理工学部 (秋田県秋田市).

S. Yashiro, R. Ono, K. Ogi and Y. Sakaida, Prediction of shear-cutting process of CFRP cross-ply laminates using smoothed particles hydrodynamics, American Society of Composites 29th Technical Conference, 2014 年 9 月 8 日 ~ 10 日, La Jolla (USA).

黄木 景二, 須磨 建太, 大田 敦史, 中田 翔, 中村 徳子, CFRP 積層板における最適せん断加工条件の探索, 日本機械学会中国四国学生会第 44 回学生員卒業研究発表講演会, 2014 年 3 月 6 日, 鳥取大学 (鳥取県鳥取市).

齋藤 慧, 黄木 景二, 重松 豊, 植芝 真吾, CFRP 積層板における最適穿孔加工条件の探索, 日本機械学会中国四国学生会第 44 回学生員卒業研究発表講演会, 2014 年 3 月 6 日, 鳥取大学 (鳥取県鳥取市).

中村 徳子, 中田 翔, 黄木 景二, 熱可塑および熱硬化 CFRP 積層板のせん断切断挙動, 第 5 回日本複合材料会議 (JCCM-5), 2014 年 3 月 4 日 ~ 6 日, キャンパスプラザ京都 (京都府京都市).

R. Ono, S. Yashiro, K. Ogi and Y. Sakaida, Damage evolution in CFRP laminates by shear cutting: Experiment and numerical analysis, The 13<sup>th</sup> Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, 2013 年 11 月 11 日 ~ 13 日, 東京ビックサイト (東京都江東区).

重松 豊, 黄木 景二, 植芝 真吾, 齋藤 慧, CFRP 積層板におけるパンチを用いた穿孔加工, プラスチック成型加工学会成形加工シンポジウム '13, 2013 年 11 月 7 日 ~ 8 日, 倉敷市芸文館 (岡山県倉敷市).

大田 敦史, 黄木 景二, 中田 翔, 中村 徳子, 須磨 建太, CFRP 積層板のせん断切断加工, 第 38 回複合材料シンポジウム, 2013 年 9 月 24 日 ~ 26 日, 鹿児島大学工学部 (鹿児島県鹿児島市).

{ その他 }

ホームページ

<http://www.me.ehime-u.ac.jp/labo/kikais>

[ei/zairiki/kogi/kogi-j.htm](http://www.me.ehime-u.ac.jp/labo/kikais/ei/zairiki/kogi/kogi-j.htm)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

黄木 景二 (OGI, Keiji)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 70281194

### (3) 連携研究者

矢代 茂樹 (YASHIRO, Shigeki)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号: 00452681