

## CFRTPの被雷後の 構造健全性に関する研究

東京大学工学系研究科システム創成学専攻

指導教員 高橋淳教授  
37096363 村上裕馬

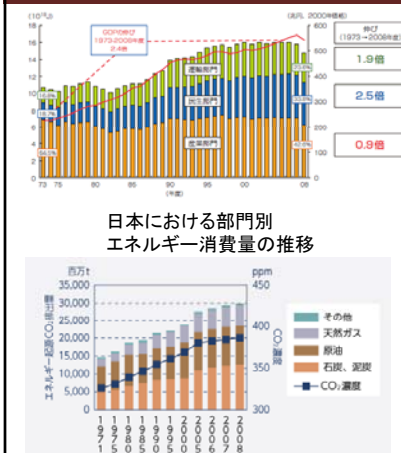
1

## 発表内容

- 研究背景
- 放電開始臨界電圧の測定
- 電荷を与えたCFRPの損傷評価
- 損傷を受けたCFRPの強度評価
- CFRPの熱伝導シミュレーション
- 損傷を受けたCFRPの挙動評価
- 結論

2

## 研究背景



大気中CO2濃度とエネルギー起源のCO2排出量の推移

参考文献: 経済産業省資源エネルギー庁エネルギー白書2010

- 運輸部門は、石油への依存度が高く、二酸化炭素排出量の削減が急務である。
- 軽量かつ比強度・比剛性に優れたCFRP(炭素繊維強化樹脂)を利用した自動車の開発が進められている。
- リサイクル性・加工性に優れたCFRTP(炭素繊維強化熱可塑性樹脂)の自動車への利用が期待されている。

雷に対する特性を調査する必要がある。

## FRP製構造体の落雷への対策



図: 落雷を受けた風車のブレード



図: 航空機に落雷後、地面に再放電

- 雷保護装置としてレセプタが設置されている
- GFRP製のものでも、塩分の付着などにより落雷することがある。
- ➔ 大損害を引き起こす。

- 航空機は落雷によって構造健全性が失われると墜落する可能性がある
- 表面の導電性を高めるために特別な加工を施している

大衆車の場合においても、導電性を持たせることが不可欠である

参考文献: 出野勝 風力発電システムの雷被害に関する研究、2005  
Coast to Coast AM HP <http://www.coasttocoastam.com/>

4

## CFRP製自動車の開発



トヨタ レクサスLFA

- 熱硬化性CFRPを使用(レーシングカーと同じ)
- 2010年販売開始
- 高価・成形速度に問題がある



高速成形ボディ

- 熱可塑性CFRPを使用
- 優れた成形速度を実現
- 量産に向いている
- まだ、生産段階には至らず

熱可塑性CFRPを使用した量産車は開発段階  
実用化に向けた動きが高まっている

参考文献:トヨタ LFA HP <http://www.lexus-lfa.com/index.html>  
帝人 プレスリリース <http://www.teijin.co.jp/news/2011/jbd110309.html>

5

## 熱硬化性CFRPと熱可塑性CFRPの違い

熱可塑性CFRP (CFRTP)	熱硬化性CFRP (CFRTS)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 化学反応が既に完了した樹脂</li> <li>• 固体→液体→固体の可逆変化が可</li> <li>• 成形終了後でも熱溶解するため再成形が可</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 化学反応(架橋反応)により硬化させる樹脂</li> <li>• 可逆変化が不可能(不可逆性樹脂)</li> <li>• 成形終了後再成形不可</li> </ul>
<p>Linear → Heat → Melt/Form → Wavy → Cool → Linear</p>	<p>Linear → Heat → Crosslinking</p>
<p>化学反応を伴わないので成形時間が短い</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 化学反応が必要なので成形時間が長い</li> <li>• 昇温制御が十分でないと樹脂の性能が発揮されない</li> </ul>

参考文献: (社)日本機械工業連合会, (財)次世代金属・複合材料学会研究開発協会  
「平成19年度 熱可塑性樹脂複合材料の機械工業分野への適用に関する調査報告書」, 2008

6

## 構造体における耐雷性の重要性

	構造健全性	人間の安全	現状の対策
航空機	◎	◎	表面の導電性UP
風車	○	×	レセブタ
大衆車	△	◎	今はない

➢自動車に求められる構造健全性とは・・・

人間の安全性の確保→絶対条件  
構造健全性の確保→可能な限り

これらの観点から、CFRTPの構造健全性を評価することが重要である

CFRPの導電性、損傷の評価、熱による影響、スパークの挙動の評価を行う。

7

## 放電開始臨界電圧

➢放電開始臨界電圧とは・・・

スパーク端子から一定の距離を保ちながら電圧を上げていき、初めてスパークが確認された時の電圧  
→低いほど雷が当たりやすい

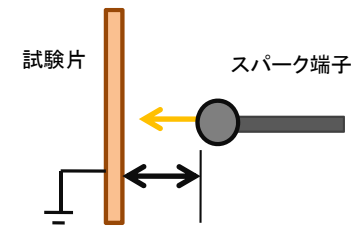
➢自動車そのものに雷が当たる確率に関しては変わらない。  
雷の進展の最終段階において、どこに選択的に雷が当たるかという指標になる

➢一方向炭素繊維熱可塑性樹脂(UD材)、炭素繊維テープ強化熱可塑性樹脂(CTT材)、炭素繊維マット強化熱可塑性樹脂(CMT材)、アルミニウムを用いて実験を行う。



CTT材

CMT材

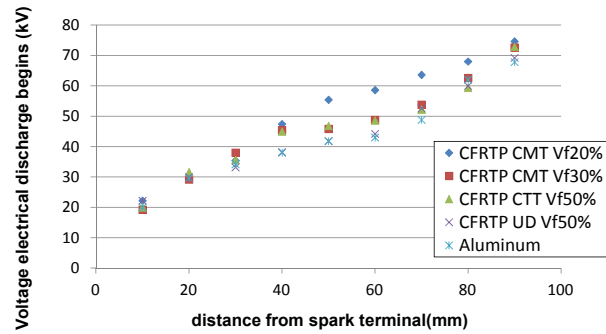


高電圧電源装置を用いて、昇圧を行う

➡ 超音波溶着接合を行った試験片に関しても同様の実験を行った。

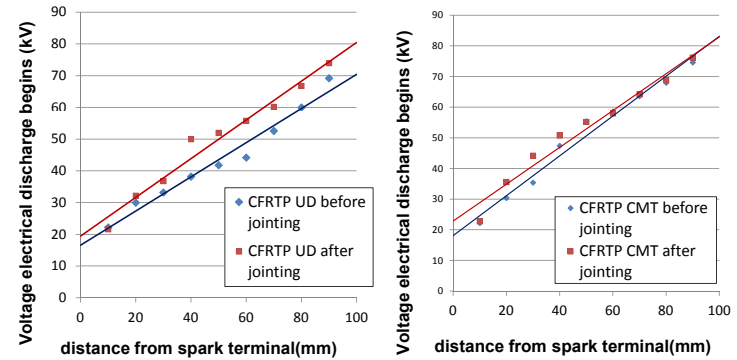
8

### 放電開始臨界電圧の測定結果



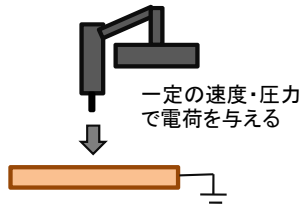
- 導電性が高い試験片ほど放電開始臨界電圧が低いという結果が得られた。
- 導電性の高い試験片では、空気の絶縁が破れやすい性質を持つ
- 製造の精度が高い場合には電気的性質も安定しており、特徴的な差異を確認できると言える。

### 接合後の試験片における放電開始臨界電圧の変化



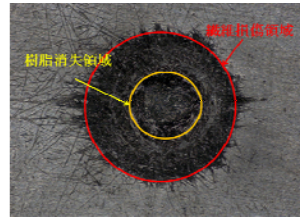
- 接合前と比較して、接合後は放電開始臨界電圧が高くなる
- 接合面の導電性の低下が原因であると考えられる

### PERCUSSION WELDERによる損傷評価



大容量コンデンサを用いて、試験片に電荷を与える

- 損傷の形状について分析
- 損傷の面積を測定
- 電圧・静電容量から発生するジュール熱を算出
- ジュール熱と損傷面積の関係を見る



- 電極直下の部分に樹脂がすべて消失しているためにへこんでいる領域
- ➔樹脂消失領域
- その外側は繊維が損傷しているため、見た目は盛り上がっている領域
- ➔繊維損傷領域

### 損傷の形状



CMT材 Vf20%



CMT材 Vf30%



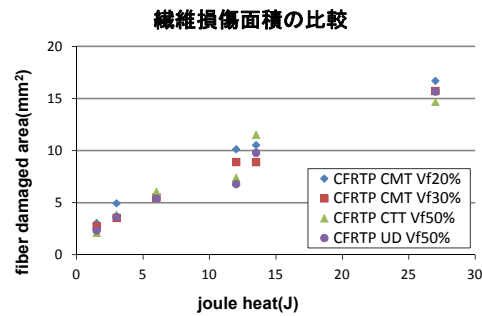
CTT材 Vf50%



UD材 Vf50%

- CMT材はVfが違っていても同じ形状損傷の拡がり円形である
- CTT材は、試験片の一番上にあるシートの炭素繊維の方向に損傷が拡がる性質を持つ
- 炭素繊維の連続性が分断される箇所では、繊維損傷が止まる
- ➔連続繊維の熱伝導が止まるため
- UD材は、繊維方向に大きな損傷の拡がり確認
- 繊維と垂直方向は損傷の拡がり小さい
- 損傷の形状は電気的異方性、熱的異方性を持っていると考えられる

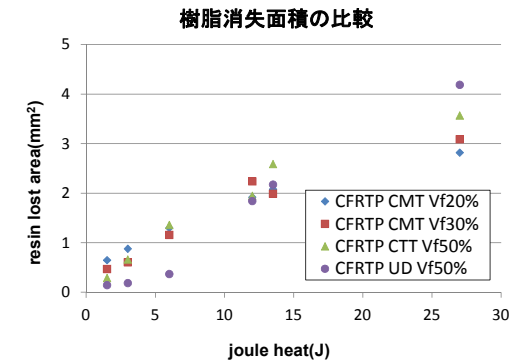
## 繊維損傷面積の比較



- 熱量と繊維損傷面積に相関関係が見られた。
- 若干ではあるが、Vfが低いほうが繊維損傷面積が大きい
- Vfが低いほうが、電気エネルギーを逃がしにくいということが原因であると考えられる。

13

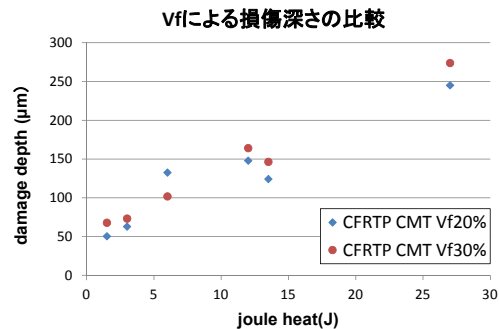
## 樹脂消失面積の比較



- 樹脂消失面積はVfが高い方が大きいという結果が得られた。
- 樹脂消失の量自体には差が少なく、単位体積当たりの樹脂の量が違うことが原因であると考えられる。

14

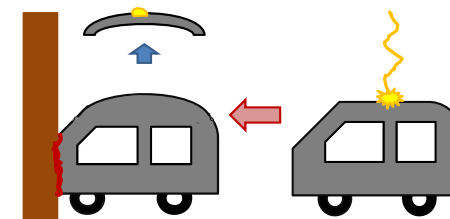
## 損傷深さの比較



- Vfの違いによって、損傷の深さは有意差は見られなかった。
- CTT材、UD材に関しては、損傷深さの計測が非常に困難であったので、今回は測定を行わなかったが、定性的観測では、CMT材と比べて深さは小さかった。

15

## 損傷を受けたCFRPの強度評価



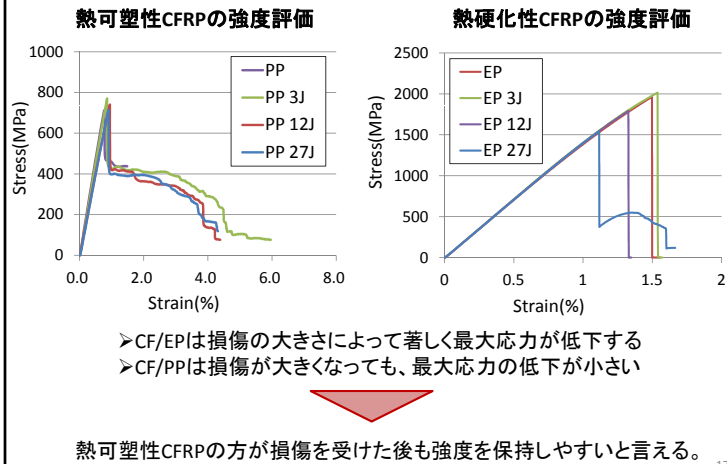
自動車のルーフに被雷した場合、両支点から圧縮側の力を受ける。

本来は座屈強度に関する試験を行うべきであるが、複合材料の場合、非常に困難である。

- 損傷を受けていない側からの3点曲げ試験を行う。
- 熱硬化性CFRP (CF/EP UD材) と、熱可塑性CFRP (CF/PP UD材) において与える熱量を変化させて、最大応力の変化を考察する。

16

### 損傷を受けたCFRPの強度評価結果

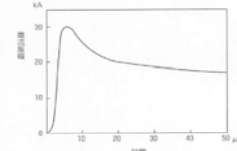


17

### CFRPの熱伝導シミュレーションによる樹脂消失面積の推定

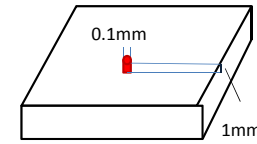
- 50×100×2[mm]の試験片を設定
- 中心に熱量を与え、樹脂消失面積を推定した。
- 材料のVf、樹脂の消失する温度、板厚方向の熱伝導率、試験片のサイズのパラメータを変化させる

#### ➢熱量を与える時間の設定



雷電流は1μsでピーク値に達し、50μsで半減する  
 ➔0.001sと設定

#### ➢熱源の面積・深さの設定



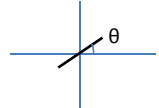
最小となるように設定  
 ➔熱源半径0.1mm  
 熱源深さ1mmと設定

参考文献: 石井勝 よくわかる雷対策の基本と技術 2006

18

### CFRPの熱伝導シミュレーションの条件設定

#### ➢熱伝導率の設定



- 炭素繊維が連続していると仮定
- 各繊維の角度を考慮すると、炭素繊維の実質の熱伝導率は、

$$\frac{4 \int_0^{\pi} \cos^2 \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} d\theta} = \frac{2}{\pi}$$

以上から、CFRPの熱伝導率を以下に定義する

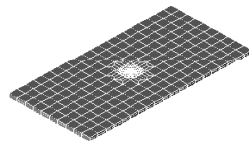
$$K = p_r K_r + \frac{2}{\pi} p_f K_f$$

$P_r$ : 樹脂割合、 $k_r$ : 樹脂の熱伝導率  
 $P_f$ : 炭素繊維割合、 $k_f$ : 炭素繊維の熱伝導率

#### ➢板厚方向の熱伝導率の設定

- (1)板厚方向に十分な熱伝導性を持っている場合 ➔面内方向と同じ
- (2)板厚方向の熱伝導性が小さい場合 ➔PPと同じ

Total Node : 9189  
 Total Element : 6064



試験片モデル

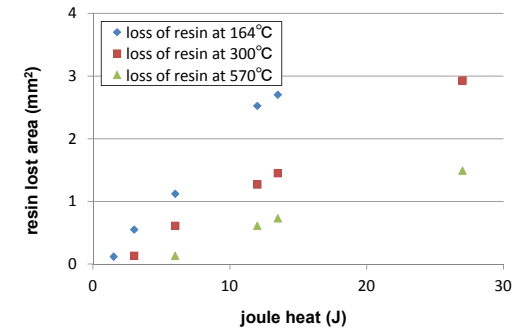
19

### シミュレーション結果(樹脂消失温度による違い)

#### 樹脂消失温度による樹脂消失面積の比較

PPの融点: 164°C  
 PPの発火点: 570°C

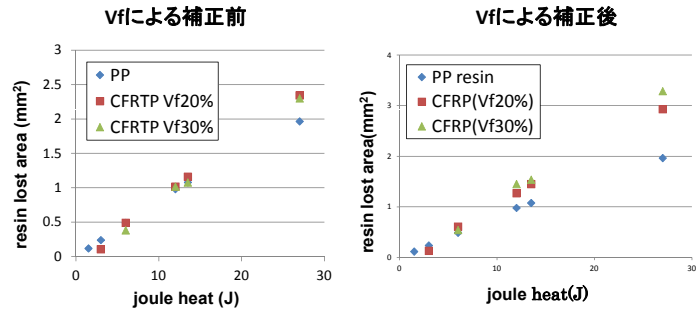
➢PPが消失する温度は164~570°Cの間であると考えられる



- 樹脂消失温度によって、樹脂消失領域は大きく異なる。
- 樹脂消失温度が300°Cの時、実験結果とほぼ同じとなる。
- 樹脂消失温度の定量的評価が必要であると考えられる。

20

### シミュレーション結果(材料による違い)

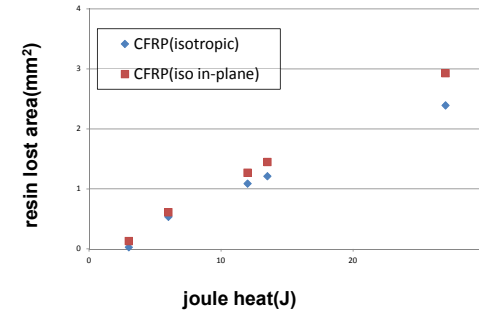


> Vfによる補正を行う前は、樹脂消失面積にはあまり差が見られなかった。  
 > Vfによる補正を行うと、Vfが高い方が樹脂消失面積が大きいう結果が得られた。  
 →樹脂消失面積はVfが与える影響が大きいと推測される。

21

### シミュレーション結果 (板厚方向の熱伝導率による違い)

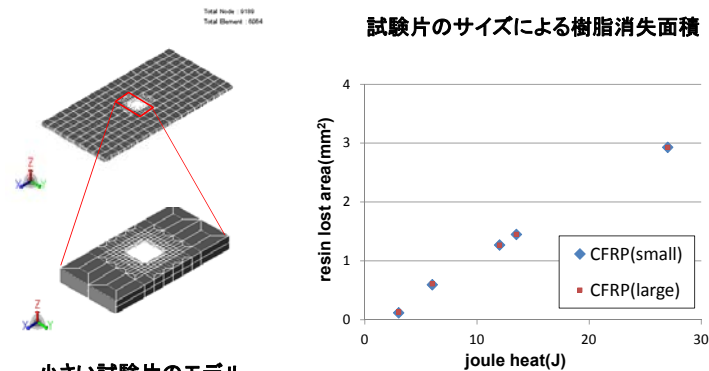
板厚方向の熱伝導率を変化させた場合の樹脂消失面積



> 板厚方向の熱伝導率が低いほど樹脂消失面積は大きくなる  
 > 板厚方向の熱伝導率は損傷深さに影響を与えると考えられる。

22

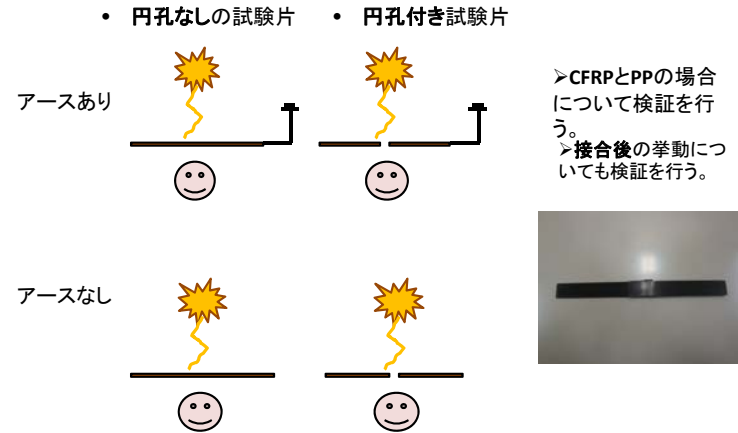
### シミュレーション結果(試験片のサイズによる違い)



> 試験片のサイズは繊維損傷面積への影響が軽微である。  
 > 試験の際には任意のサイズを設定することが出来ると考えられる。

23

### 損傷を受けた場合のスパークの挙動



24



### 損傷を受けた場合のスパークの挙動 PPとCFRPの比較(アースあり)



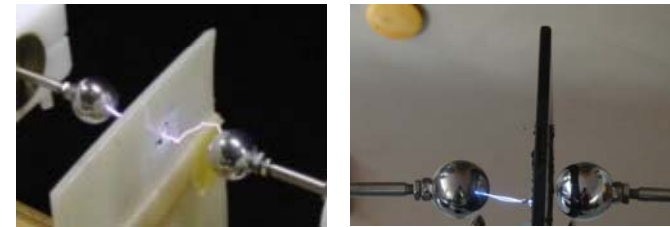
PPで遮蔽した場合

CFRPで遮蔽した場合

- 導電性のないPPで遮蔽した場合、スパークは迂回して導体に当たる
- CFRPで遮蔽した場合は、スパークが導体に到達しない

25

### 損傷を受けた場合のスパークの挙動評価 円孔付きPPと円孔付きCFRPの比較(アースあり)



円孔付きPPで遮蔽した場合

円孔付きCFRPで遮蔽した場合

- 円孔付き試験片の場合においても、円孔なしの場合と同じ挙動を示す。

26

### 損傷を受けた場合のスパークの挙動評価 アースされているかどうかによる比較



アースされているCFRPで遮蔽

アースされていないCFRPで遮蔽

- アースされている場合は、スパークが導体に到達しないのに対し、アースされていない場合は、CFRPに当たった後、再放電が起きる。

27

### 損傷を受けた場合のスパークの挙動評価 アースされているかどうかによる比較(円孔付きCFRP)



アースされている円孔付きCFRP

アースされていない円孔付きCFRP

- 円孔付きCFRPの場合においても、アースの有無によってスパークの挙動が異なる

28

## 損傷を受けた場合のスパークの挙動評価 接合したCFRP(アースあり)



溶着接合を行った試験片で遮蔽

▶接合後は接合部の導電性によって、スパークの挙動が異なる  
接合の際に、導電性を確保することが必要であると考えられる。

29

## 結論

CFRTPの雷に対する特性を調べる実験を行い、以下に示す結論が得られた。

- ▶ 放電開始臨界電圧は導電性の高さにある程度依存する。
- ▶ CFRP試験片に電荷を与えた時の損傷の進展は、電氣的異方性、熱的異方性に大きく依存する。
- ▶ 熱可塑性CFRPは損傷を受けても強度低下が起きにくいという特長がある。
- ▶ 熱伝導解析の結果、熱量と樹脂消失面積は強い相関関係がある。
  - 樹脂損傷面積は繊維体積含有率、板厚方向の熱伝導率に依存し、板の寸法は影響がない
- ▶ CFRPはアースされていれば効率よく電荷を流すので、乗員への安全性が言える。
  - 接合の方法により導電性が失われた場合は電荷を逃がしきれずに危険性が増す可能性がある。

30

ご清聴ありがとうございました。

END

31