

# 低温環境下におけるCFRP板材の層間剥離に及ぼす鋼球斜め衝突について

MAEDA, Kenta / 前田, 健太

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

56

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2015-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00011039>

# 低温環境下における CFRP 板材の層間剥離に及ぼす 鋼球斜め衝突について

EFFECT OF OBLIQUE IMPACT OF STEEL BALL ON LAYER DELAMINATION  
OF CFRP LAMINATES UNDER LOW TEMPERATURES

前田健太

Kenta MAEDA

指導教員 崎野清憲

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) is one of composite materials. It is used for industrial components because of light weight, excellent in strength, stiffness and a corrosion-resistant. However, CFRP have the problem causing a delamination between layers by the impact. Invisible delaminates may cause a great accident. In this study, a relationship between collision speed and delamination area of CFRP laminates was investigated. The impact tests that detect the effect of impact angles and low temperatures on the layer delamination area of CFRP laminate are made using an air-gun system and incubator. Scanning Acoustic Microscopy (SAM) is utilized for detecting the delamination area of CFRP laminates. The residual strength of the specimen being damaged is also examined by using three point bending device. In the low-temperatures, thermal stress generated at each layer and the interface of each layer. Therefore, delamination area was increased as compared to the room temperature.

**Key Words:** CFRP laminates, Delamination area, Collision angle, Low temperature, SAM

## 1. 緒論

炭素繊維強化プラスチック(以後, CFRP)は, マトリックスと強化材の組み合わせである高分子系複合材料の中でも, 高比強度, 高比弾性率, 高耐食性等の長所を有し, 様々な分野において工業用材料として過酷な条件下での使用される. CFRP は積層された繊維方向と垂直方向から衝撃を受けると層間剥離を生じ易いという問題がある. 乗り物など高速で移動する構造物は, 垂直方向以外のあらゆる角度から衝撃を受けることが想定される. また, 宇宙空間など, 厳しい温度環境が材料に与える影響を考慮する必要がある. そこで, 本研究では CFRP の鋼球衝突損傷におよぼす衝突角度, 温度の影響を明らかにするために, 鋼球の衝突角度を調整し, 低温環境下で衝突実験を行い, 比較, 検討を行った. 衝突によって, CFRP に生じる層間剥離面積を, 超音波探査装置(日立, HYE-FOCUS, レンズ周波数 50MHz)を用いて測定し, 各条件下における剥離面積と衝突速度の関係を検討した.

## 2. 実験

### (1) 試験片

試験片はトーレ製プリプレグ(P-3052S-12)を 8 層に積層した CFRP 板を使用する. トーレ製プリプレグ

は糸に高性能炭素繊維トレカ糸を, マトリックスに硬化剤を含む熱硬化性樹脂(エポキシ: #2500-130℃硬化型)を用いて構成される. プリプレグの積層による繊維配向は $[0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ]_s$ である. 試験片は全て寸法が縦 100mm, 横 40mm で, 積層板の厚みは 1.0mm, 炭素繊維含有率は 67vol%である.

### (2) 実験条件

本実験で用いた飛翔体は直径 6mm のスチール球である. スチール球をホールドするサボットは直径 20mm で長さが 60mm の円柱形発泡ポリスチレンを用いた. CFRP 板への飛翔体の衝突速度範囲は 100m/s~200m/s とする. 衝突角度は  $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$  とする. 試験温度は, 常温(294K), 203K, 75K とした. 203K はエタノールとドライアイス, 75K は液体窒素をそれぞれ用いて試験片を冷却した. 試験温度は, 熱電対を使い試験片の表面温度を計測した.

### (3) 実験方法

Fig.1 に衝撃試験装置の概要を示す. 斜め衝突時には, 専用の治具に CFRP 試験片を固定する. 円柱形状のサボット内の空洞にスチール球を設置したものを筒状の銃身に挿入する.

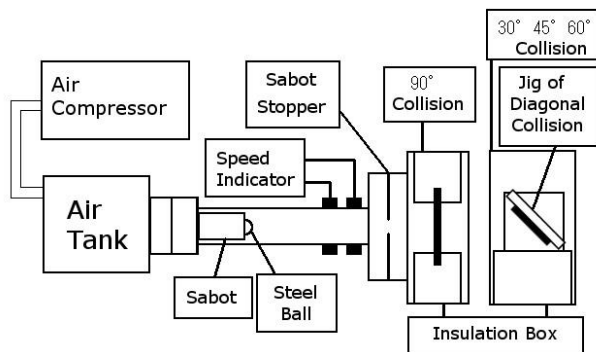


Fig.1 Experimental device for impacting damage of CFRP

エアコンプレッサーによりエアタンク内に圧縮空気を蓄える。発射口にはセロハンの隔壁があり、それを破壊することでエアタンク内に蓄積された圧縮空気が瞬時に銃身へ解放され、飛翔体が加速しながら銃身内を進む。銃口から発射後、スチール球とサボットは分離し、スチール球が試験片に衝突する。飛翔体の試験片への衝突速度は、エアタンクの圧縮空気圧を変える事で変化させた。各衝突速度は試験片の直前に設置された二組の光電素子の間を通過した時間をスピードインジケーターによって測定し、そこから割り出した。

#### (4) 残留曲げ強度試験

衝撃を受けた CFRP 板材の残留強度を評価するために三点曲げ試験を行った。

曲げ試験片は衝撃を与えた板より衝撃点を中心に含むよう幅 15mm、長さ 100mm に切り出し、標点間距離を 80mm、圧子の移動速度を 2.67mm/min として荷重をかけた。そして式(1)を用いて残留曲げ強度を求めた。

$$\sigma = \frac{PL}{bh^2} \left[ 1 + 4 \left( \frac{\delta}{L} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ここで、 $\sigma$  は残留曲げ強度 (MPa) , P は最大曲げ荷重 (N) ,  $\delta$  はたわみ (mm) , b は試験片の幅 (mm) , h は試験片の厚さ (mm) , L は支点間距離 (mm) である。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 衝突角度別の衝突速度と剥離面積の関係

Fig. 2 は、常温で得られた衝突角度毎の剥離面積と衝突速度の関係を示したグラフである。衝突角度の減少に伴い、剥離面積が減少していることがわかる。90° 衝突時の剥離面積と比べ、60° では約 22%、45° では約 67%、30° では、約 90%剥離面積が減少している。

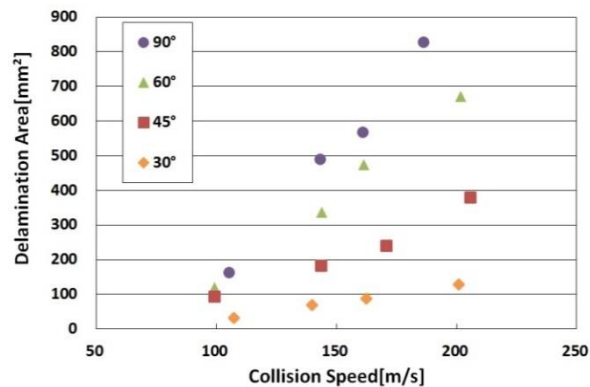


Fig.2 Relation between collision speed and delamination area in each collision angle

Fig. 3 は、90° 衝突と 45° 衝突の際の内部剥離画像である。2/3 層間はピンク色、3/4 層間は赤色、5/6 層間は緑色、6/7 層間は水色、7/8 層間は青色で示されている。90° 衝突では、7/8 層間の剥離が衝突点から上下に拡大しているのに対し、45° 衝突では衝突点から上部にのみ拡大している。また、その他の層間剥離も上部に集中している。

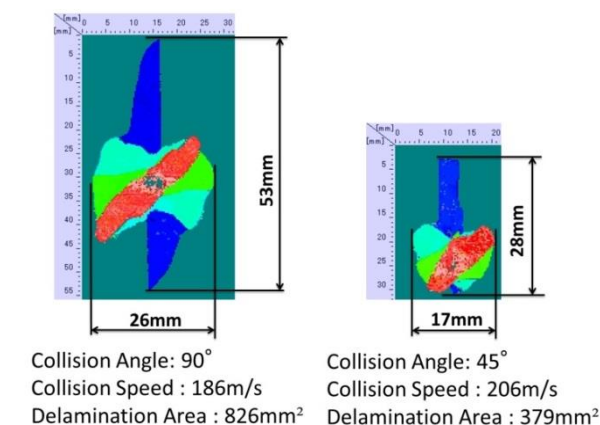
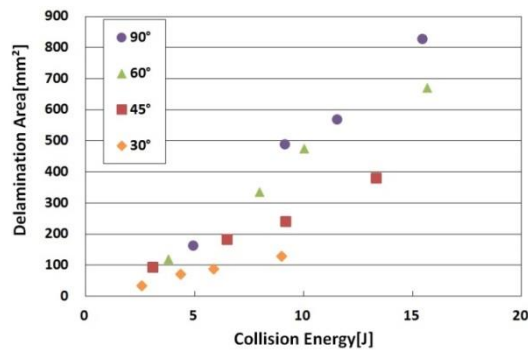


Fig.3 Delamination image by 90° collision and 45° collision , respectively

衝突角度が減少することで剥離面積が減少したのは、板面との衝突角度によって鋼球の持つエネルギーが、板面に対し垂直成分と水平成分に分散されることが大きな要因である。垂直成分のエネルギーは 30° , 45° , 60° でそれぞれ約 50%, 30%, 15%減少する。Fig. 4 は衝突角度別の分散された垂直成分の衝突エネルギーと剥離面積の関係である。衝突速度を統一したためエネルギーにはバラつきが見られるが、同程度のエネルギーの際にも、衝突角度の減少に伴い、剥離面積が減少している。

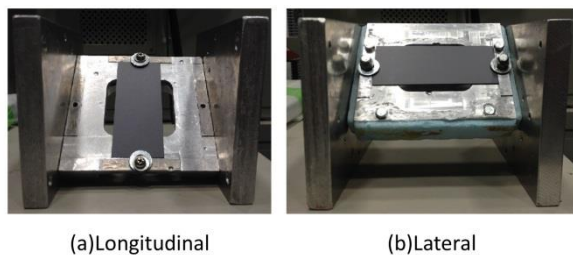


**Fig.4 Relation between collision energy of normal component and delamination area in each collision angle**

衝突角度の減少に伴い、衝突時の水平成分のエネルギーが増加するため、CFRP 板材に伝わる垂直成分のエネルギーは減少する。また、衝突の際に生じる水平成分のエネルギーによって、荷重点の移動が起こり、一点に荷重がかかるのではなく、荷重点の移動範囲に垂直成分のエネルギーが更に分散され、衝突によるCFRP 板材のたわみが減少するため、同量のエネルギーにおいても斜め衝突では剥離面積が減少したと考えられる。荷重点の移動は、水平成分のエネルギーが増加するほど範囲が広がるため、衝突角度が減少することで剥離面積は減少する。また、荷重点の移動により層間に発生するせん断応力、たわみによる引張力が鋼球の進行方向に集中したため、上部に剥離が集中したと考えられる。

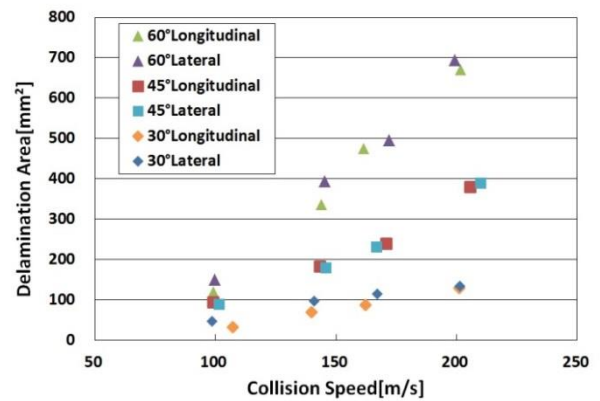
## (2) CFRP 板材の積層繊維方向の違いによる斜め衝突時の衝突速度と剥離面積の関係

斜め衝突において、今回使用した試験片の形状では、長辺方向を縦に固定した時（以後、縦固定）と、横に固定した時（以後、横固定）では、剥離面積の形状に違いが現れた。Fig.5は、それぞれの試験片の固定方法である。縦固定の場合の表面からの積層繊維方向は $[90^\circ / -45^\circ / 0^\circ / 45^\circ]$  s である。横固定の場合は $[0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ]$  s である。固定方法の違いによる衝突速度と剥離面積の関係、各層間の剥離面積について比較検討する。



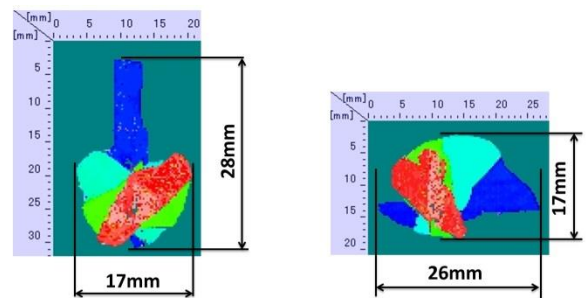
**Fig.5 Difference in installation mode**

Fig.6は、固定方法別の衝突角度毎の衝突速度と剥離面積の関係を示したグラフである。固定方法が異なっても剥離面積の量はほとんど同じであることがわかる。



**Fig.6 Relation between collision speed and delamination area caused by difference in installation and by collision angles**

Fig.7は45° 衝突における縦固定時、横固定時の内部剥離画像である。縦固定時は、前述の通り鋼球の進行方向に剥離が集中し、7/8層間の剥離が上部に集中している。横固定時は、3/4, 5/6, 6/7層間の剥離が上部に集中しており、7/8層間の剥離は左右に発生していることがわかる。

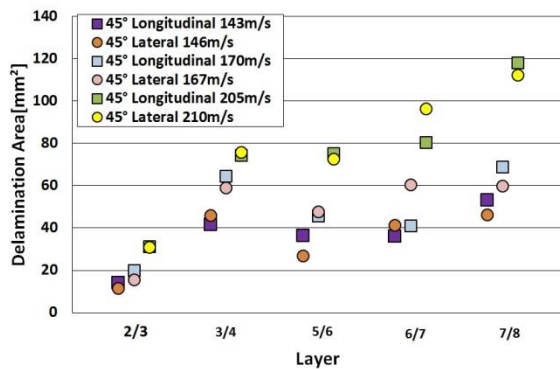


Fixed Method : Longitudinal  
Collision Angle: 45°  
Collision Speed : 206m/s  
Delamination Area : 379mm<sup>2</sup>

Fixed Method : Lateral  
Collision Angle: 45°  
Collision Speed : 210m/s  
Delamination Area : 388mm<sup>2</sup>

**Fig.7 Delamination image caused by difference in installation and by 45° collision, respectively**

Fig.8は固定方法別の45° 衝突における速度毎の各層間の剥離面積のグラフである。6/7層間の剥離は横固定時の方が増加しており、7/8層間では、縦固定時の方が増加していることがわかる。



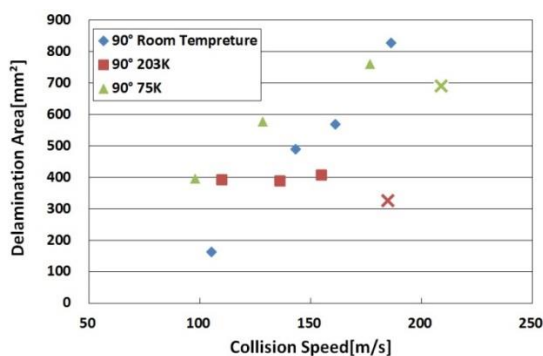
**Fig.8 Relation between each layer and delamination area caused by difference in installation and by 45° collision**

固定方法によって内部剥離形状に違いが現れたのは、衝突後の鋼球の進行方向と CFRP 板材のたわみ方向がそれぞれ異なるためであると考えられる。縦固定では、CFRP 板材のたわみ方向と鋼球の進行が影響を与えるたわみ方向が同じ方向であり、横固定では、たわみ方向と鋼球の進行が影響を与えるたわみ方向が 90° 異なる。そのため、横固定では、鋼球の進行方向の影響を受け、45° 方向に剥離が発生する 6/7 層間の剥離が拡大し、0° 方向に剥離が発生する 7/8 層間の剥離が減少したと考えられる。

CFRP 板材が受ける衝突エネルギー量は同じであるため、全体の剥離面積量はほとんど変わらなかったと考えられる。

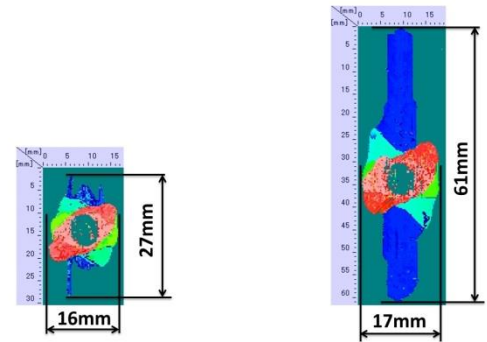
### (3) 低温環境における衝突速度と剥離面積の関係

Fig. 9 は低温環境下における 90° 衝突の剥離面積と衝突速度の関係を示したグラフである。プロット点の × 印は貫通を表している。常温では、衝突速度の上昇に伴い、剥離面積が増加しているが、203K では、衝突速度が上昇しても、剥離面積が増加していないことがわかる。また、185m/s では CFRP 板材が貫通したため、剥離面積が減少している。75K では、衝突速度の上昇に伴い、剥離面積が増加しており、常温時に比べ剥離面積が増加していることがわかる。209m/s では 203K と同様に貫通しており、剥離面積が減少している。



**Fig.9 Relation between collision speed and delamination area at low temperatures by 90° collision**

Fig. 10 は、低温における 90° 衝突の内部剥離画像である。203K、75K においては、いずれも貫通している。Fig. 3 の常温と比べ、203K では、2/3 層間以外の各層間の剥離が減少しており、特に 7/8 層間の剥離がほとんど発生していないことがわかる。75K では、常温と比べ 2/3、7/8 層間以外の剥離は減少しているが、7/8 層間の剥離は拡大している。また、203K と 75K の低温時においても傾向に違いが見られた。

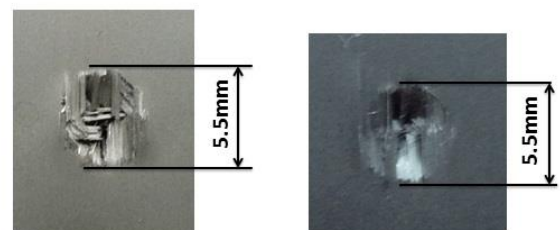


Temperature: 203K  
Collision Angle : 90°  
Collision Speed : 185m/s  
Delamination Area : 325mm<sup>2</sup>

Temperature: 75K  
Collision Angle : 90°  
Collision Speed : 209m/s  
Delamination Area : 690mm<sup>2</sup>

**Fig.10 Delamination image by 90° collision at temperatures of 203K and 75K, respectively**

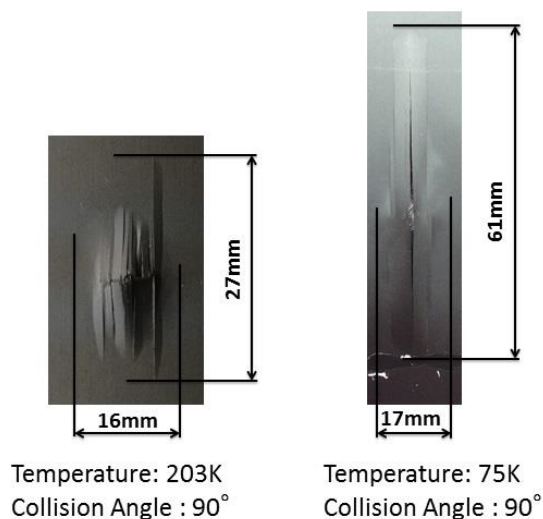
Fig. 11, 12 は Fig. 10 と同条件の衝突表面、衝突裏面の様子である。常温では、表面に衝突痕の中心部分の炭素繊維の破断、裏面に CFRP 板材のマトリックス材であるエポキシ樹脂の繊維方向の割れが見られる。203K では、表面の衝突部分のマトリックス、繊維がほとんど破断しており、裏面は主に繊維が破断している。75K では、表面は 203K と同様であるが、裏面は衝突点の中心とその左右にマトリックスの繊維方向の割れが見られ、8 層目の繊維破断は確認されなかった。



Temperature: 203K  
Collision Angle : 90°

Temperature: 75K  
Collision Angle : 90°

**Fig.11 Front surface of both specimens impacted by 90° at temperatures of 203K and 75K, respectively**



**Fig.12 Back surface of both specimens impacted by 90° at temperatures of 203K and 75K, respectively**

本実験において低温環境下による影響は主に 2 つあると考える。1 つ目は、温度低下により CFRP 板材内部に熱応力が発生することである。使用した CFRP は、エポキシ樹脂をしみ込ませた炭素繊維シートを積層しており、各層において繊維方向の力には強いが、繊維と垂直方向の力には弱い特性を持つ。炭素繊維の熱膨張率は  $-2 \sim -4 [\times 10^6 / K]$  であり、マトリックス材のエポキシ樹脂は  $45 \sim 65 [\times 10^6 / K]$  であるため、温度を低下させた際に、各層におけるエポキシ樹脂が繊維方向には縮まず、繊維と垂直方向に縮む。そのため、各層と各層の界面に熱応力が発生する。この熱応力の影響で、層間剥離の発生応力が低下する。また、温度低下に伴い、熱応力が大きくなるため層間剥離の発生応力も低下する[1]。2 つ目は、温度低下によりマトリックス材であるエポキシ樹脂が低温脆化し、CFRP 板材の見かけ上の曲げ剛性が高くなることである。曲げ剛性が高くなることにより、CFRP 板材が曲げ変形しにくくなり、層間剥離が発生しにくくなる。特に、衝突エネルギーが増加し、CFRP 板材のたわみ量が大い時、曲げ剛性の影響を強く受けると考える。

低温環境下において 2/3 層間の剥離面積が増加したのは、衝突表面側に位置し、たわみ量が小さいため、エポキシ樹脂の脆化による曲げ剛性の影響よりも、熱応力による層間剥離の発生応力の低下の影響を受け、層間剥離面積が増加したと考えられる。

203K において、貫通しない場合も、速度上昇に伴い、8 層目の繊維破断が発生した。繊維破断に衝突エネルギーが消費されるため、剥離面積が増加しなかったと考える。これは、温度低下により CFRP 板材の曲げ剛性が高くなるため、たわみによる層間剥離が発生しにくくなり、衝突エネルギーが裏面の衝突点の部分に集中し繊維が破断したと考えられる。

75K では、7/8 層間で剥離が拡大し、8 層目の繊維

破断が発生しなかった。これは、衝突の際に 8 層目のマトリックス材が繊維方向の割れを起こしたためである。低温時は単一の層においても、繊維と垂直方向の応力が発生しているので、エポキシ樹脂が繊維方向に割れやすくなっている。そのため、203K より熱応力が大きい 75K では、マトリックス材が割れ、その割れの影響で 7/8 層間の層間剥離が発生したと考えられる。また、203K と同様に曲げ剛性が高くなったことにより、2/3, 7/8 層間以外の剥離は、常温時に比べ減少したと考える。しかし、7/8 層間の層間剥離が大幅に拡大されるため、75K では剥離面積の総量が増加している。

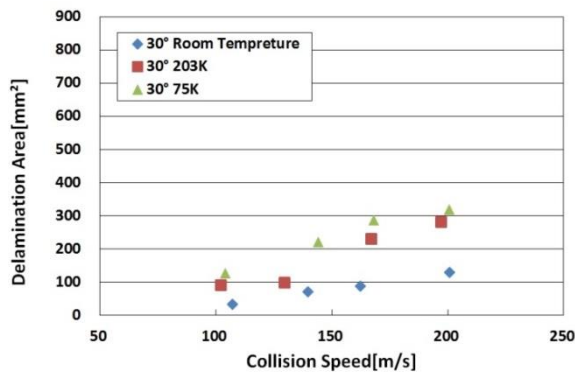
Fig.9 の 203K, 75K の衝突速度 100m/s において、層間剥離面積が増加しているのは、CFRP 板材内部の熱応力によって、層間剥離の発生応力が低下したためであると考えられる。衝突エネルギーが低く、衝突表面、裏面の繊維破断が起らないため、熱応力による層間剥離の発生応力の低下の影響を受け、層間剥離面積が増加したと考える。

低温環境下で衝突表面の繊維破断や貫通が起きるのは、エポキシ樹脂が脆化し、破壊された際に、板材内部の繊維に衝突エネルギーが伝わりやすくなるためであると考えられる。CFRP 板材において繊維と垂直方向からの衝撃への抵抗力は、エポキシ樹脂の強度であるため、エポキシ樹脂が脆くなり、曲げ剛性が高くなる影響で、衝突点付近にエネルギーが集中し、貫通が起りやすくなると考えられる。

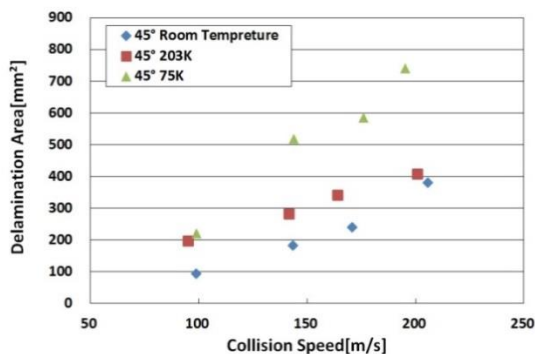
#### (4) 低温環境における衝突角度別の衝突速度と剥離面積の関係

Fig.13, Fig.14, Fig.15 は低温環境下における衝突角度毎の剥離面積と衝突速度の関係を示したグラフである。

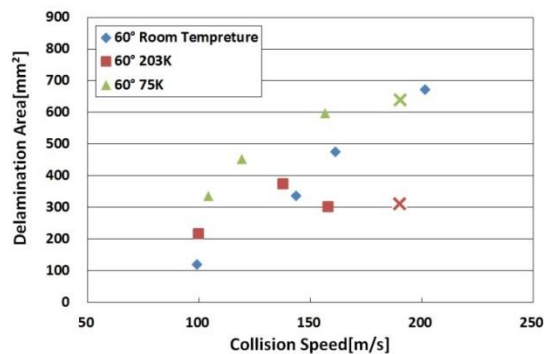
30°, 45° では、温度が低下するに伴い剥離面積が増加していることがわかる。60° では、90° 衝突と同様に、203K では、衝突速度が上昇しても剥離面積が増加せず、75K では、衝突速度の上昇に伴い、剥離面積が増加しており、常温時に比べ剥離面積が増加している。また、203K, 75K の 190m/s では、貫通している。



**Fig.13 Relation between collision speed and delamination area at low temperatures by 30° collision**

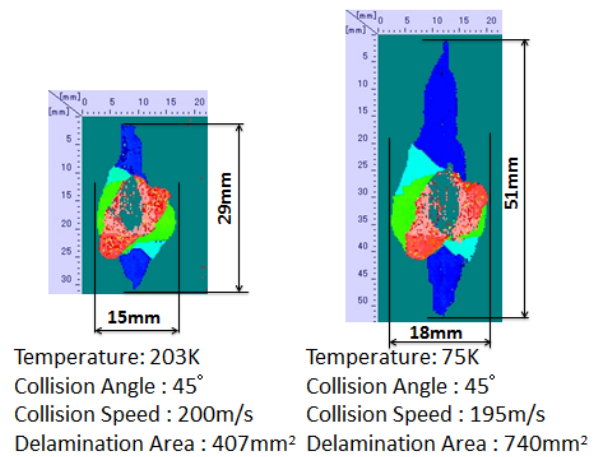


**Fig.14 Relation between collision speed and delamination area at low temperatures by 45° collision**



**Fig.15 Relation between collision speed and delamination area at low temperatures by 60° collision**

Fig. 16 は, 45° 衝突における温度条件別の内部剥離画像である. Fig.3 の常温時は, 上部にのみ発生していた 7/8 層間の剥離が, 低温時には上下に発生している. また, 30°, 60° の内部剥離の形状において同様の傾向が確認できた. ただし, 203K において 60° の剥離形状は, 90° の 203K と同様の傾向が確認された.



**Fig.16 Delamination image by 45° collision at temperatures of 203K and 75K, respectively**

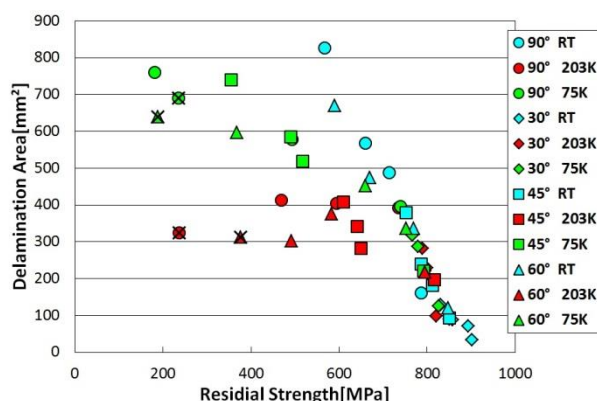
低温環境下で 30°, 45° の層間剥離面積が増加したのは, 熱応力の影響で層間剥離の発生応力が低下しているためであると考えられる. また, 層間剥離の発生応力が低下しているため, 衝突角度による荷重点の移動の影響を受ける前に, 衝突点の上部の層間剥離が発生したと考えられる. また, 温度が低下するに伴い, 層間剥離の発生応力も低下するため 203K より 75K で層間剥離面積が増加したと考える. Fig. 9 の 90° 衝突では, 203K で速度が上昇しても, 層間剥離面積が増加しなかったが, 30°, 45° 衝突では, 速度上昇に伴い, 層間剥離面積が増加している. これは, 衝突裏面の繊維破断が起こっていないためである. 30°, 45° では, 衝突角度, 荷重点の移動の影響により衝突エネルギーが減少するため, 衝突裏面の繊維が破断に至らず, 層間剥離面積が増加した. 60° の 203K において, 速度が上昇しても, 層間剥離面積が増加しなかったのは, 90° と同様に曲げ剛性が高くなったことにより衝突裏面の繊維が破断したためであると考えられる. 75K において, 速度上昇に伴い層間剥離面積が増加したのも 90° と同様に CFRP 板材内の熱応力によって, 衝突の際に 8 層目のマトリックス材が繊維方向の割れを起こしたためであると考えられる. 30°, 45° に比べ衝突エネルギーの減少割合が低いため, 90° 衝突時と同じ傾向が現れたと考えられる.

#### (5) 低温環境における衝突角度別の剥離面積と残留曲げ応力の関係

Fig. 17 は, 低温環境における衝突角度別の剥離面積と残留曲げ応力の関係のグラフである. 常温は, RT (Room Temperature) と表記してある.

常温では, 剥離面積が増加すると, 残留曲げ応力が低下しているのに対し, 203K では, 剥離面積が増加していなくても, 残留曲げ応力が低下していることがわかる. これは, 衝突表面, 裏面の繊維が破断しているためである. 75K では, 203K と比べて, 剥離面積が大きい, 残留曲げ応力はほとんど同じであることが

わかる。これは、75K では、衝突表面側の繊維は破断するが、8 層目の繊維が破断していないためと考える。層間剥離面積の増加よりも、繊維の破断により、著しく曲げ応力の低下が起こると考えられる。



**Fig.17 Relation between residual strength and delamination area obtained at low temperatures and various angles of impact**

#### 4. 結論

衝突角度の減少によって、衝突角度によって鋼球の持つエネルギーが、板面に対し垂直成分と水平成分に分散され、衝突の際に分散された水平成分のエネルギーによって、荷重点の移動が起こり、一点に荷重がかかるのではなく、荷重点の移動範囲に垂直成分のエネルギーが更に分散されるため、斜め衝突では剥離面積が減少する。

衝突後の鋼球の進行方向と CFRP 板材のたわみ方向がそれぞれ異なるため、斜め衝突において固定方法を変えると、内部剥離形状に違いが現れる。固定方法を変えても、CFRP 板材に伝わる衝突エネルギーの大きさが同じであれば、総剥離面積量はほとんど変わらない。

低温環境下では、衝突角度が低い時、板材内部の熱応力により、層間剥離発生応力が低下するため剥離面積が増加する。

203K において、衝突角度が高い時、エポキシ樹脂の低温脆化により、みかけの曲げ剛性が高くなるため、衝突裏面の繊維が破断し剥離面積が減少する。

75K において、衝突角度が高い時、曲げ剛性が高くなった影響により 2/3 層、7/8 層以外の層間剥離面積は減少するが、203K より熱応力が増加しているため、衝突裏面のエポキシ樹脂が割れる。そのため、7/8 層間の剥離面積が大幅に増加し、常温時に比べ剥離面積の総量が増加した。

CFRP 板材において繊維と垂直方向からの衝撃への抵抗力は、エポキシ樹脂の強度であり、低温環境下では、エポキシ樹脂が硬く脆くなるため、曲げ剛性、熱応力の影響で繊維破断が起こり貫通し易くなる。

層間剥離面積の増加よりも、繊維の破断により、著しく曲げ応力の低下が起こる。

#### 5. 謝辞

本研究に際して様々なご指導を頂きました崎野清憲教授に深く感謝致します。また多くのご指摘と共に実験を行なってくださった、崎野研究室の後輩、機械工学専攻の同期の皆様に深く感謝致します。

#### 参考文献

- [1] 熊澤寿(2000)「極低温推進剤タンク用 CFRP 積層板の力学的特性および推進剤漏洩」
- [2] 田中,黒川,他 2 名,日本航空宇宙学会誌 vol.37,No.425(1989),