

# B06 CFRP 円筒の座屈試験

岡本瑞希 (神奈川大・学), 宮島侑冬 (神奈川大・学), 高野敦 (神奈川大)

Mizuki Okamoto, Yuuto Miyajima, Atushi Takano (Kanagawa University)

## 1. 目的

衛星やロケット、航空機などに軽量化のため複合材料の円筒殻が使われている。複合材料の中ではCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)と呼ばれる炭素繊維と樹脂との複合材料が最も多く用いられている。円筒殻は軽量化のため薄肉にすると座屈と呼ばれる不安定現象を起こすが、この強度にはばらつきがあり理論との差異も大きい。理論値との差異の原因を追及する事を目的として、積層の重なり及びギャップ、円筒の長さに着目し、当研究室の過去の試験に対し追加の試験を行った。

## 2. これまでの CFRP 円筒殻の試験結果

### 2.1 既往の研究における試験結果

CFRP 円筒殻の座屈強度の研究は既に多くなされている。表 1<sup>(1)</sup>に既往の研究での座屈試験の結果を示す。ノックダウンファクタのばらつき及び理論との差異は大きい。ノックダウンファクタは 50%~100%の間で大きくばらついている。

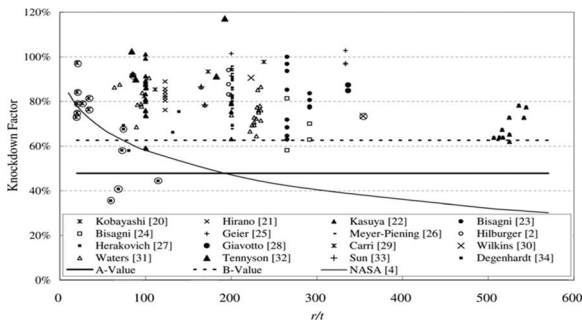


図 1  $r/t$  に対するノックダウンファクタ

### 2.2 当研究室の過去の試験結果

当研究室でこれまでに行った座屈試験の理論値と実験結果を表 2 に示す。直径  $D$  はいずれも 150mm(内径)である。

表 1 6層及び3層の座屈計算と実験値

素材, 供試体名	積層構成	板厚 $t$ [mm]	実長長さ $L$ [mm]	座屈理論値 $P_d$ [N]	実験値 $P_e$ [N]	ノックダウンファクタ	積層ギャップ
TR 6層 L/D=1	(-70/70/0/0/70/-70)	0.4878	136	21983	13197	0.600	許容
TR 6層 L/D=2	(-70/70/0/0/70/-70)	0.4878	287	21986	11870	0.540	許容
TR 6層 L/D=3	(-70/70/0/0/70/-70)	0.4878	436	21987	11537	0.525	許容
HSX 6層 L/D 1	(-70/70/0/0/70/-70)	0.336	136	18972	12997	0.685	許容
HSX 6層 L/D=3	(-70/70/0/0/70/-70)	0.336	443	19689	12647	0.642	許容
HSX 3層 L/D=1	(-70/0/70)	0.168	148	1892	1806	0.955	重なり許容
HSX 3層 L/D=3	(-70/0/70)	0.168	443	1891	1437	0.760	重なり許容

素材(TR/HSX,詳細後述)にかかわらず円筒殻が長くなるほどノックダウンファクタが小さくなっている。HSX 型 3層に関してノックダウンファクタが比較的高い数字となった。これはギャップの許容の有無が関係すると考えられる。あるいは板厚の違いによってノックダウンファクタが影響を受けていることも考えられる。

そこで今回は、積層の重なり及びギャップが円筒殻座屈強度に及ぼす影響に着目して試験を行った。同時に、円筒殻の長さの違いによる影響についても試験を行った。

## 3. CFRP 円筒殻の設計・製作

### 3.1 円筒殻の積層材

円筒殻を製作する際に使用したプリプレグは三菱レイヨン製<sup>(2)</sup>の

TR350J075S (以下 TR 型と呼ぶ)

HSX350C075S (以下 HSX 型と呼ぶ)

であり、これは過去の試験片も同様である。厚さは TR 型 0.081mm, HSX 型 0.056mm となっている。

TR 型は事前に引張試験を行っており、その際得られた実測値から弾性率  $E_{11}$  は 114000MPa を用いた。HSX 型は繊維の弾性率  $E_f$  はカタログ値より、繊維の体積含有率  $V_f$  は 55% と仮定し計算した結果から弾性率  $E_{11}$  は 249652MPa を用いた。

### 3.2 円筒殻の設計・製作

TR型、HSX型ともに過去に製作した試験片と同じ積層構成の(-70/70/0/0/70/-70)で6層の円筒殻を設計した。円筒殻成形のためプリプレグを切り出し、マンドレル(心金)に積層させ加熱・成形した。積層の重なりによる影響を調べるため、プリプレグを切り出す際に5mm多く切り出した。実際にマンドレルに積層させる際には、人の手による巻きつけであることから0~5mmの積層重なりとなった。成形した円筒殻を $L/D=1$ 及び3に切り分け、圧縮試験用の治具を上端、下端に市販の接着剤で接着した。3軸の歪ゲージを上段、中段、下段の周方向 $90^\circ$ 毎に計12枚貼り付けた。上段、下段は治具から5mmの点に貼り、中段は $L/2$ の位置に貼った。

#### 4. 圧縮試験

##### 4.1 試験方法

位置調整のため方眼紙を敷き、均一に荷重をかけるため試験片の上部にゴムとシリコンゴムを重ねその上に鉄板をのせ、下部にはゴムを敷いた。鉄板には丸頭のボルトがあり、一点で荷重を負荷できる。図2に試験機に設置した試験片の外観を示す。

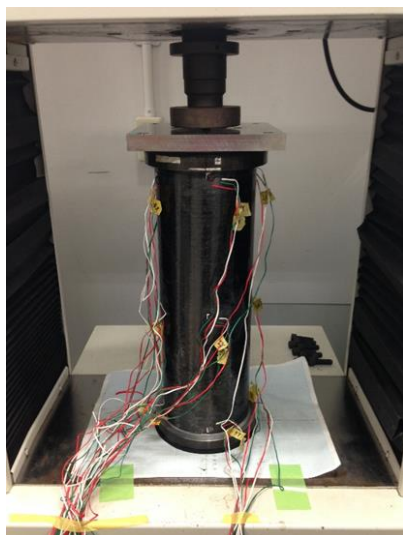


図2 圧縮試験準備

はじめに十分小さい荷重を負荷し、試験片中段の機軸方向に生じている歪に偏りがなければ確認

し、偏りがある場合位置調整を行った。これを繰り返し、偏りがなくなるまで位置調整を行った。ただし、動かしても変化がない場合や、位置調整によって荷重点と荷重軸中心が著しくずれる場合は歪の偏りを無視し、座屈試験を行う。

まず、座屈荷重予想値(ロックダウンファクタを0.5とみなし、それを考慮した値)の半分の荷重を負荷し、データに異常がないか確認した。次に座屈が起きるまで荷重を負荷し、そのまま座屈時の変位の1.5倍まで荷重を負荷し、除荷した。

#### 4.2 実験結果

##### 4.2.1 TR型6層 $L/D=1$

今回試験を行った積層重なりを許容した試験片の試験結果を図3、図5に示す。積層ギャップを許容した試験片の試験結果を図4、図6に示す。

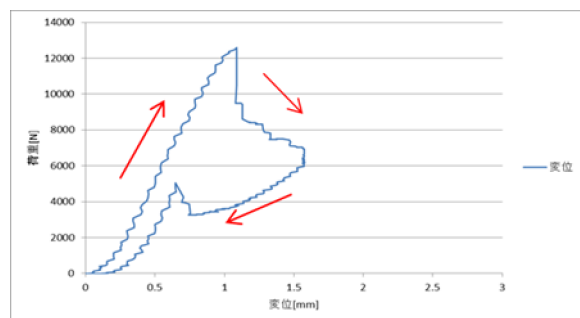


図3 荷重と変位(重なり許容)

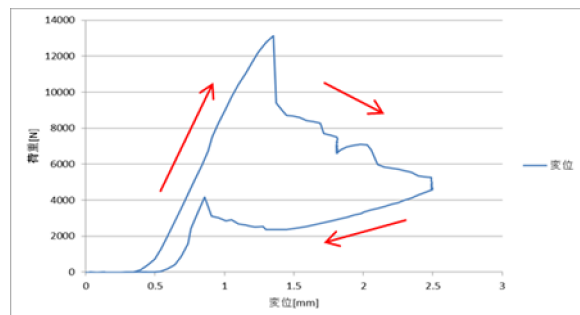


図4 荷重と変位(ギャップ許容)

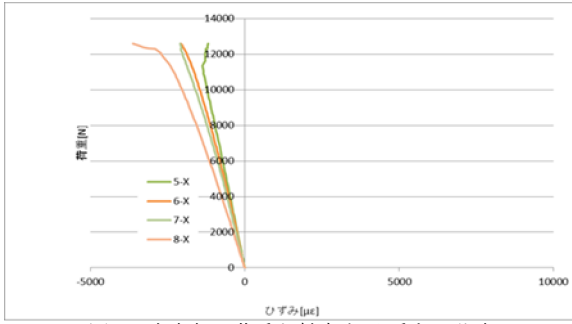


図5 中央部の荷重と軸方向歪(重なり許容)

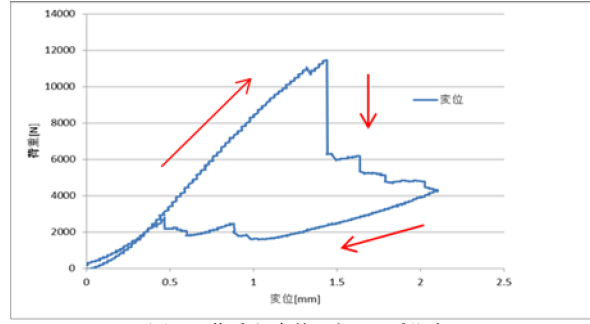


図8 荷重と変位(ギャップ許容)

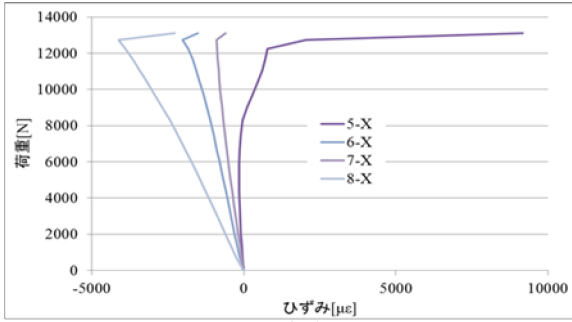


図6 中央部の荷重と軸方向歪(ギャップ許容)

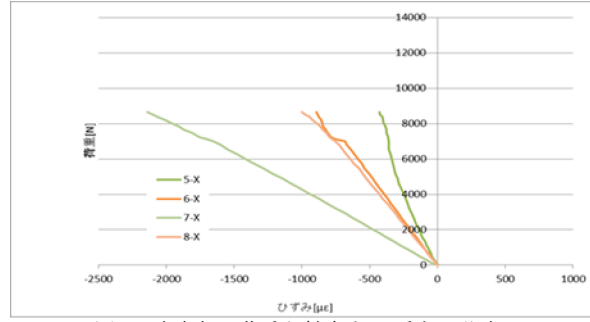


図9 中央部の荷重と軸方向歪(重なり許容)

軸方向歪についてギャップを許容した試験片はばらつきが大きい、ロックダウンファクタは重なりを許容した試験片がわずかに小さい値となった。

#### 4.2.2 TR型6層 L/D=3

今回試験を行った積層重なりを許容した試験片の試験結果を図7、図9に示す。積層ギャップを許容した試験片の試験結果を図8、図10に示す。

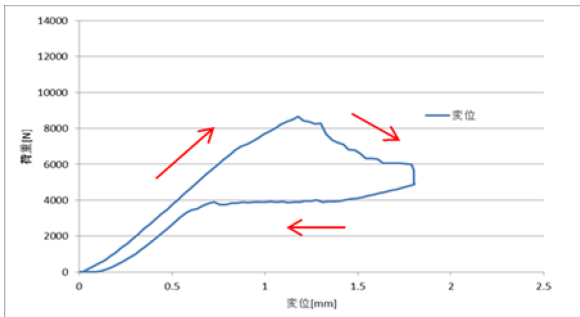


図7 荷重と変位(重なり許容)

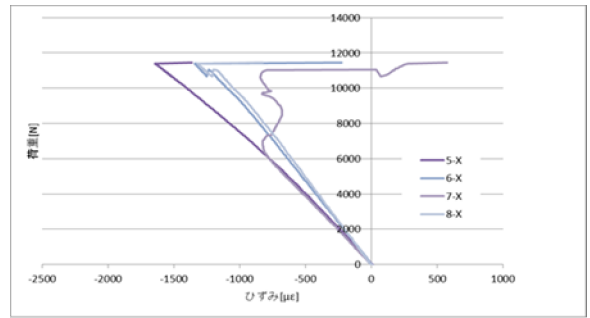


図10 中央部の荷重と軸方向歪(ギャップ許容)

図8に比べ図7のグラフは早期の座屈が発生していることがわかる。試験直後に試験状態を確認したところ、試験機と試験片の荷重点のズレによる荷重オフセットがあることが判明した。図9にある軸方向歪のばらつきも荷重オフセットによるものであると考えられる。

#### 4.2.3 HSX型6層 L/D=3

今回試験を行った積層重なりを許容した試験片の試験結果を図11、図13に示す。積層ギャップを許容した試験片の試験結果を図12、図14に示す。

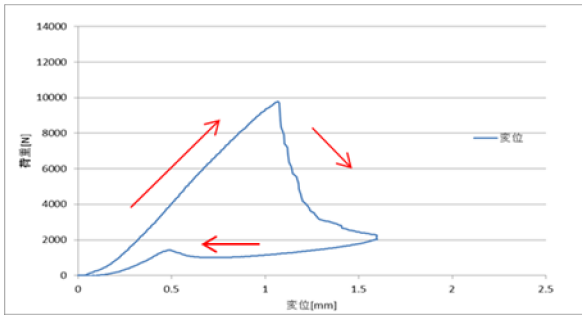


図 11 荷重と変位(重なり許容)

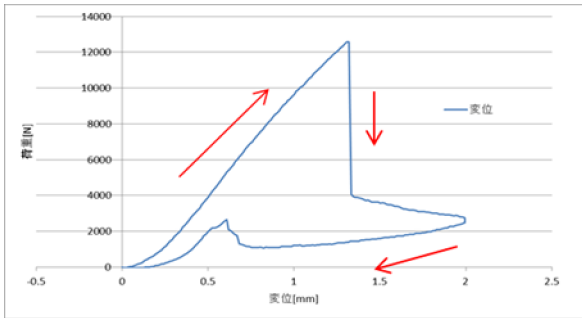


図 12 荷重と変位(ギャップ許容)

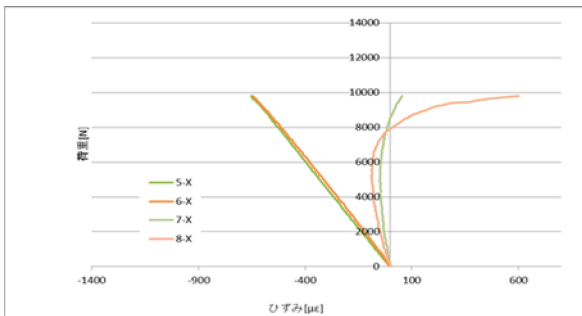


図 13 中央部の荷重と軸方向歪(重なり許容)

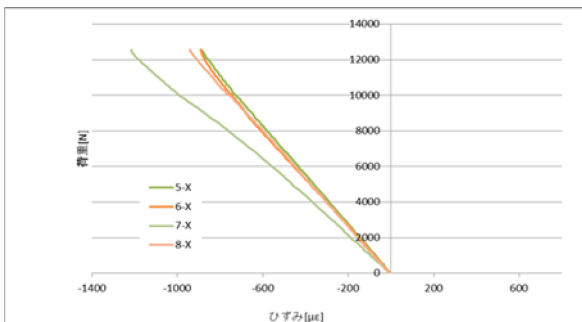


図 14 中央部の荷重と軸方向歪(ギャップ許容)

図 13 のグラフにおいて荷重に対する歪の非線形性がみられる。これにより積層板として破損が生じ、ロックダウンファクタの低下につながった可能性がある。

#### 4.3 評価

今回得られた実験結果と比較対象のデータを表 3 に示す。

表 2 実験結果と積層ギャップによる比較

素材, 供試体名	積層構成	板厚 $t$ [mm]	実測長さ $L$ [mm]	座屈理論値 $P_c$ [N]	実験値 $P_e$ [N]	ロックダウン ファクタ	積層ギャップ
TR 6層 L/D=1	(-70/70/0/0/70/-70)	0.4878	136	21983	13197	0.600	許容
IR 6層 L/D=1	(-70/70/0/0/70/-70)	0.4878	136	21983	12665	0.576	重なり5mm
IR 6層 L/D=3	(-70/70/0/0/70/-70)	0.4878	436	21987	11537	0.525	許容
TR 6層 L/D=3	(-70/70/0/0/70/-70)	0.4878	436	21987	8738	0.397	重なり5mm
HSX 6層 L/D=3	(-70/70/0/0/70/-70)	0.336	443	19689	12647	0.642	許容
HSX 6層 L/D=3	(-70/70/0/0/70/-70)	0.336	436	19689	9875	0.502	重なり5mm

積層重なりによるロックダウンファクタの向上は見られなかった。TR 型  $L/D=3$  重なり 5mm の試験においては荷重オフセットがあり、正確なデータが得られなかった。

#### 5. 考察

##### 5.1 荷重オフセットの影響

TR 型  $L/D=3$  重なり 5mm の試験において位置調整は円筒下端中心で位置合わせしていたため円筒上部中心と圧縮試験機の荷重軸中心が 8mm ずれていた。これによって曲げ応力が発生し早期の座屈に至ったのではないかと考えた。曲げ応力を算出し、座屈応力との比率を計算すると 21% の曲げ応力が発生していた。これを補正率として実験値に加算するとロックダウンファクタは 0.481 となった。これは統計的な下限値(99% 下限の 95% 信頼度による推定値 0.479)を超え、表 3 に示すように他の TR6 層の値 0.525~0.600 に近づいた。しかしこれらの値は依然として低いため、他の要因によって早期の座屈が起きた可能性がある。

表 3 曲げ応力補正後の実験値

素材, 供試体名	積層構成	板厚 $t$ [mm]	実測長さ $L$ [mm]	座屈理論値 $P_c$ [N]	実験値 $P_e$ [N]	ロックダウン ファクタ	積層ギャップ
TR 6層 L/D=1	(-70/70/0/0/70/-70)	0.488	136	21983	13197	0.600	許容
TR 6層 L/D=1	(-70/70/0/0/70/-70)	0.488	136	21983	12665	0.576	重なり5mm
TR 6層 L/D=3	(-70/70/0/0/70/-70)	0.488	436	21987	11537	0.525	許容
TR 6層 L/D=3	(-70/70/0/0/70/-70)	0.488	436	21987	10573	0.481	重なり5mm

また TR 型だけではあるが、長さによるロックダウンファクタの減少が見られた。

##### 5.2 積層応力の影響

局所的な応力によって材料破壊が起き、早期の座屈に至ったのではないかと考え、座屈時の荷重

を用いて積層ごとの安全余裕を求めるため、一様板厚とした場合の異方性円筒殻の線形理論解<sup>(3)</sup>を用いて計算した。計算結果を表 5、表 6 に示す。

表 4 TR 型の積層毎の安全余裕

Ply No	1	2	3	4	5	6
Thickness	0.0813	0.0813	0.0813	0.0813	0.0813	0.0813
Angle(Deg)	-70	70	0	0	70	-70
MS Tsai Wu	4.08	4.77	4.00	4.95	8.82	11.81

表 5 HSX 型の積層毎の安全余裕

Ply No	1	2	3	4	5	6
Thickness	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056
Angle(Deg)	-70	70	0	0	70	-70
MS Tsai Wu	7.083	8.289	1.857	2.465	15.813	22.040

MS\_Tsai\_Wu (Tsai-Wu の強度則による積層ごとの安全余裕) の欄はいずれも正であるため、計算上は積層板としての材料破壊は起きていない。したがって、TR 型  $L/D=3$  重なり許容の試験片において早期の座屈は荷重軸中心のズレによる要因が大きいと考えられる。HSX 型  $L/D=3$  の試験片は積層重なりによって荷重に対する歪の非線形性が生じ、積層板としての破損が生じた可能性がある。

### 5.3 積層角のズレによる影響

マンドレルに積層する際、重なりを 5mm にするために角度を調節しながら巻いていた。これによって積層角にズレが生じ、座屈強度が低くなった可能性があると考え、角度を用いて強度解析を行った。巻き始めから 1 周した際に 5mm の重なりを設けると、重なりを設けなかった時に比べ積層角度に  $0.608^\circ$  のズレが生じる。積層構成を (-70.608/70.608/0/0/70.608/-70.608) として強度解析を行った。計算結果を表 6 に示す。

表 6 積層角のズレによる座屈強度

素材, 供試体名	積層構成	座屈理論値 $P_{cr}$ [N]	座屈応力 $\sigma_{cr}$ [MPa]	積層角のズレ
TR 6層 $L/D=3$	(-70/70/0/0/70/-70)	21987	95.7	考慮せず
TR 6層 $L/D=3$	(-70.608/70.608/0/0/70.608/-70.608)	21725	94.5	考慮
HSX 6層 $L/D=3$	(-70/70/0/0/70/-70)	19689	124.3	考慮せず
HSX 6層 $L/D=3$	(-70.608/70.608/0/0/70.608/-70.608)	19253	121.6	考慮

ズレを考慮した場合、座屈理論値は低下しているが、5mm の重なりによって生じる積層角のズレは小さく、座屈強度に及ぼす影響も少ないと判明

した。したがって、積層時に生じる積層角のズレが座屈強度の減少の大きな要因とは考え難い。

## 6. 結言

本研究において、積層重なりによる座屈強度の向上は見られなかった。逆に今回の試験ではすべての試験片において座屈強度が減少する結果となった。これは積層の重なりによる局所的な荷重の偏心によって歪の非線形性が生じ、積層板としての局所的な破損が生じ、座屈を誘発したものと考えられる。

また、TR 型のみだが円筒殻の長さの違いによる座屈強度への影響を確認する事が出来た。HSX 型に関しても今後同様の試験を行い検証していく。

今回の実験では考慮しなかった板厚の違いによる影響についても検討し、今後追加の試験を行う必要がある。

## 参考文献

- 1) A. Takano, Statistical Knockdown Factors of Buckling Anisotropic Cylinders Under Axial Compression, Journal of Applied Mechanics, 2012, Vol. 79 / 051004-1
- 2) 三菱レイヨン パイロフィル部  
<https://www.mrc.co.jp/pyrofil/product/pre.html>
- 3) 高野, 一般異方性円筒殻の軸圧縮・ねじりおよび複合荷重に対する閉じた解, Transactions of the JSME, Vol.80, No.812 (2014)