

B13 CFRP 円筒殻の座屈強度

伊藤直由（神奈川大・学），鈴木直人（神奈川大・学），高山泰成（神奈川大・学）高野敦（神奈川大）

Naoyuki Ito, Naoto Suzuki, Yasunori Takayama, Atushi Takano (Kanagawa University)

1. 目的

航空機・宇宙機の構造部材としては複合材料、特に CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)製円筒殻が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も大きい。これには形状の不整による影響があるといわれている。その中でも特に積層の重なり/ギャップの有無に着目し、当研究室の過去の試験に対し追加の試験を行った。さらにひずみゲージの有無が座屈強度に与える影響を確認する。

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。図 1⁽¹⁾に既往の研究での座屈試験の結果を示す。横軸は半径 r と板厚 t の比を表している。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く、50%～100%の間で大きくばらついている。

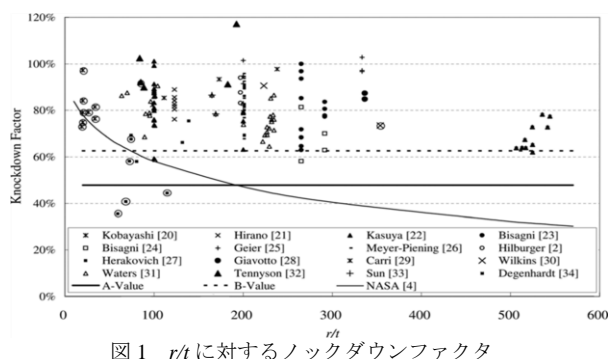


図 1 r/t に対するノックダウンファクタ

3. CFRP 円筒殻の設計・製作

3.1 円筒殻の積層材

CFRP 円筒殻の設計・製作に使用したプリプレグは三菱レイヨン製⁽²⁾の

・TR350J075S(以下 TR 型と呼ぶ)

・HSX350C075S(以下 HSX 型と呼ぶ)

を使用した。これは当研究室における過去の円筒殻試験片と同様のものである。弾性率(繊維方向)は過去に行った引張試験結果より TR 型 114.7GPa、HSX 型 260.3GPa を用いた。厚さ(実測)は TR 型 2 層(-50/50)の場合 0.0813mm、HSX 型 2 層(-50/50)の場合 0.0582mm となっている。また、円筒殻の直径 D は 150mm(内径)、長さ L は 150mm の $L/D=1$ で製作した。

3.2 円筒殻の設計・製作

TR 型、HSX 型ともに昨年度に製作した円筒殻試験片と同じ積層構成の 2 層(-50/50)で円筒殻を設計・製作した。円筒殻成形のためプリプレグを切り出し、マンドレル(円筒金型)に積層させ加熱成形した。積層の重なり/ギャップが座屈強度に与える影響を調べるため、プリプレグを切り出す際、重なりを許容する場合は通常より 5mm 多く、ギャップを許容する場合は 5mm 少なくなるように切り出した。成形した円筒殻を $L/D=1$ に切り分け、圧縮試験用治具のリングを上端、下端にそれぞれ市販の接着剤で接着した。さらに 3 軸ひずみゲージを円筒殻の上部、中央、下部の周方向 90°毎に合計 12 枚貼り付けた。上部、下部は治具の端面から 5mm の位置に貼り、中央は $L/2$ の位置に貼った。

3.3 円筒殻接着用支柱

円筒殻と治具の接着時、傾いた状態で接着されてしまうと荷重軸中心が円筒殻軸中心とずれ、曲げ応力が発生してしまう。これが原因で座屈強度が低下してしまう可能性が考えられた。そこで円筒殻と治具を垂直に接着するための支柱を製作

し、この問題を解決できないかと考えた。接着剤は完全に硬化するまで時間がかかり、2工程に分けて行う。そのため支柱上部に取り付ける固定用板を2種類製作し各工程に対応させた。この支柱を用いて接着した円筒殻の荷重軸中心のずれを実際に計測したところ0.2mmであった。当研究室における過去に製作した円筒殻試験片において、位置調整を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試験機の荷重軸中心が8mmずれてしまったことがあった。このずれと比較すると支柱を用いて接着した場合のずれは十分小さな値である。したがって接着による問題点を改善できたと考えた。図2.1及び図2.2に円筒殻接着用支柱を示す。また、図3に治具のリングに接着剤を入れた様子、図4に接着中の様子を示す。



図 2.1 円筒殻接着用支柱
(1回目用)



図 2.2 円筒殻接着用支柱
(2回目用)

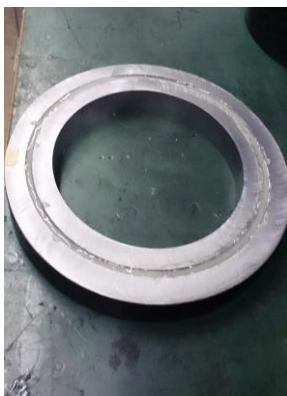


図 3 接着剤を入れた
治具のリング



図 4 接着中の様子

4. 圧縮試験

4.1 試験方法

位置調整のため方眼紙(位置調整の目安になるように線を引いてある)を敷き、均一に荷重をかけるため円筒殻試験片の下部にはゴムシートを敷いた。上部にはゴムシート、シリコンゴムシートの順番で上に重ね、さらにその上に鉄板をのせた。鉄板の中心部には丸頭のネジが挿入されており、一点で荷重を負荷できる。図5に試験機に設置した円筒殻試験片の外観を示す。

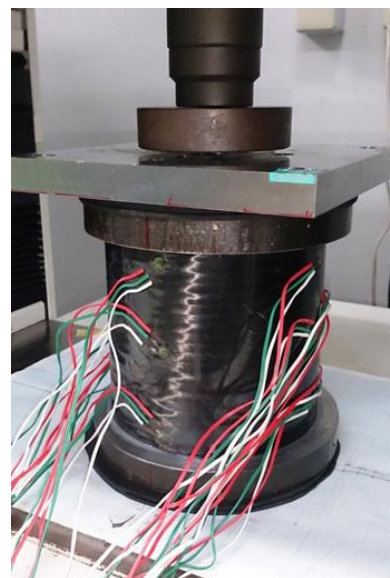


図 5 圧縮試験準備

はじめに十分小さい荷重(今回の場合 100N)を負荷し、試験片中央に貼った4枚のひずみゲージから、機軸方向に生じているひずみに偏りがないか確認した。偏りがある場合試験片上部にある鉄板を動かし、可能な範囲で位置調整を行った。この作業を何度か行い、それでもひずみの偏りが改善しない場合、多少のずれは軸ずれの範囲内とみなし調整を終了した。まず、座屈荷重予想値(ノ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、座屈後は座屈時における変位量の1.5倍の変位まで荷重を負荷していった。その後荷重を取り除いていき元の状態に戻した。

4.2 実験結果

4.2.1 TR 型 2 層 $L/D=1$

今回試験を行った TR 型 2 層 $L/D=1$ の円筒殻試験片において、積層重なりを許容した場合の試験結果を図 6、図 9 に示す。また、積層ギャップを許容した場合の試験結果を図 8、図 10 に示す。

さらにこれとは別に重なりを許容した場合のみであるが、ひずみゲージを貼らなかった試験片の試験も行った。この結果を図 7 に示す。

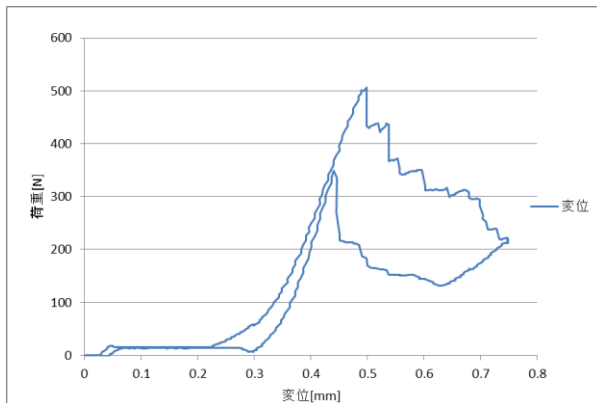


図 6 荷重と変位(重なり許容)

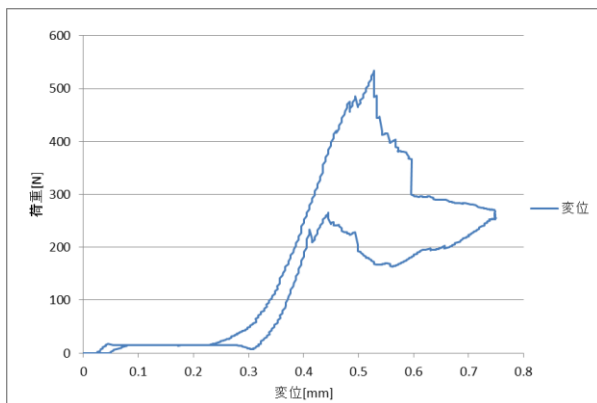


図 7 荷重と変位(重なり許容※ひずみゲージなし)

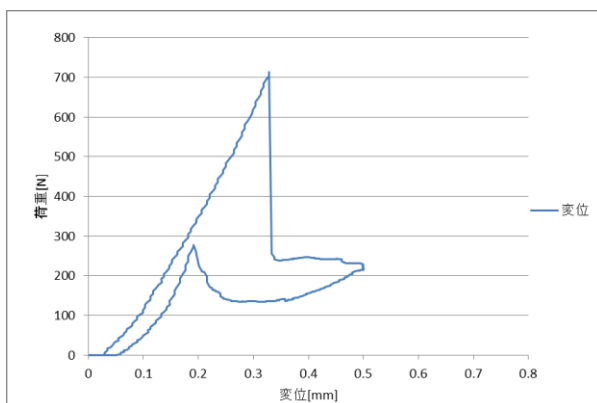


図 8 荷重と変位(ギャップ許容)

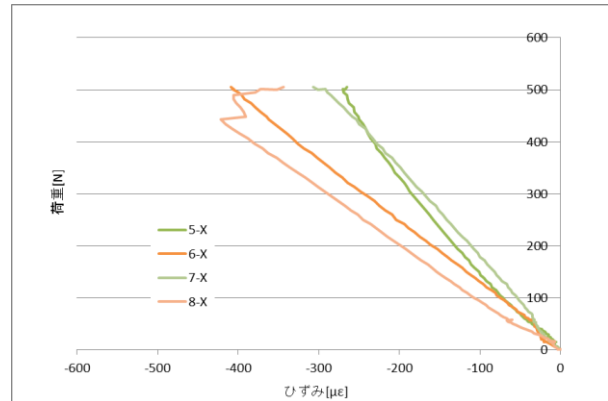


図 9 中央部の荷重と軸方向ひずみ(重なり許容)

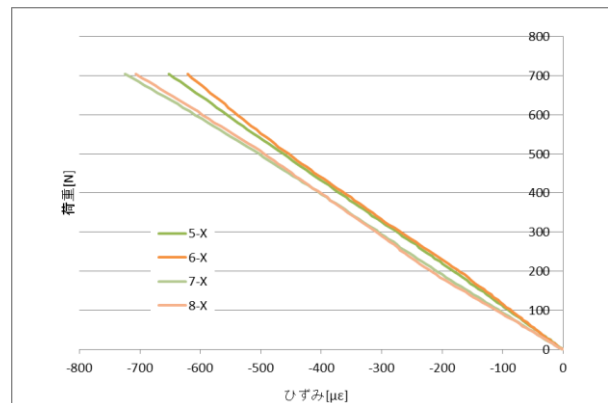


図 10 中央部の荷重と軸方向ひずみ(ギャップ許容)

試験片中央部における荷重と軸方向ひずみは座屈荷重に達するまでを示している。ギャップを許容した場合は中央部の 4 箇所のひずみに大きなずれは見受けられないが、重なりを許容した場合に大きなずれが生じていることがわかる。4.3 節で示すが、ロックダウンファクタに大きな違いはなく、変位に対する荷重も座屈荷重に達するまではほぼ線形を示しており問題ないと考えた。

4.2.2 HSX 型 2 層 $L/D=1$

今回試験を行った HSX 型 2 層 $L/D=1$ の円筒殻試験片において、積層重なりを許容した場合の試験結果を図 11、図 13 に示す。また、積層ギャップを許容した場合の試験結果を図 12、図 14 に示す。

試験片中央部における荷重と軸方向ひずみについて、ギャップを許容した場合に荷重 400N 付近で一箇所だけひずみが大きく変化している。これはそのひずみ測定部で局所的な座屈が起こり始めているためだと考えられる。

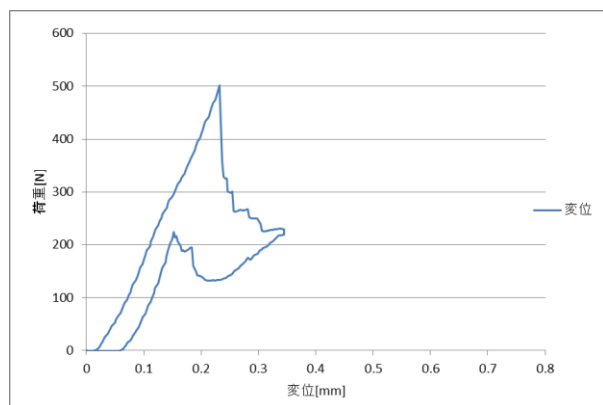


図 11 荷重と変位(重なり許容)

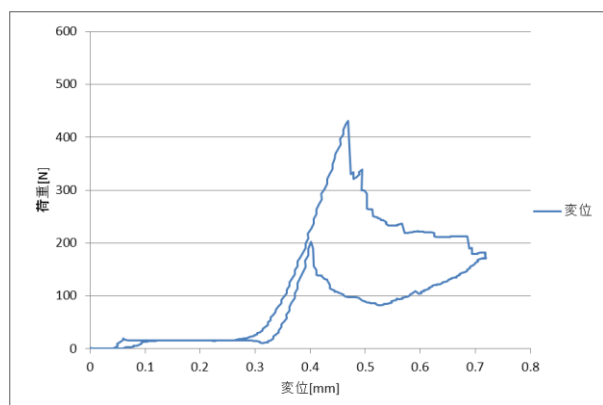


図 12 荷重と変位(ギャップ許容)

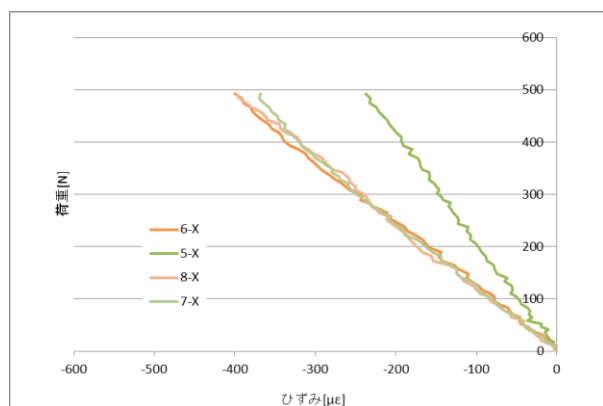


図 13 中央部の荷重と軸方向ひずみ(重なり許容)

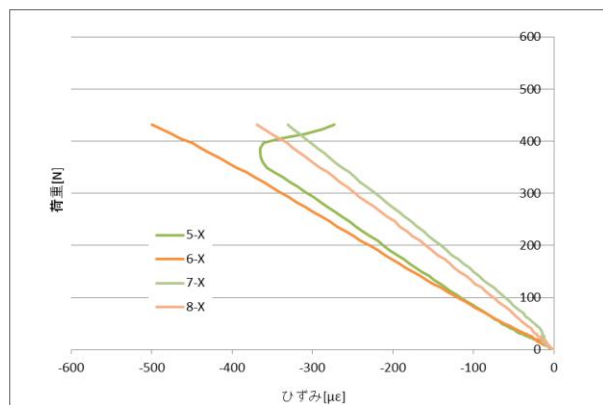


図 14 中央部の荷重と軸方向ひずみ(ギャップ許容)

4.3 評価

今回得られた試験結果に比較対象であるデータ(HSX 2層 $L/D=1$ 重なり許容の試験データは昨年度研究生の試験より得られたもの)を加えたものを表 1 に示す。

表 1 試験結果と積層の重なり/ギャップによる比較

試験年度	供試体名	積層構成	板厚 t [mm]	実測長さ L [mm]	座屈理論値 P_s [N]	実験値 P_a [N]	ロックダウン ファクタ	積層重なり/ ギャップ
2015年度	HSX 2層 $L/D=1$	(-50/50)	0.0582	136	964	583	0.605	重なり
2016年度	HSX 2層 $L/D=1$	(-50/50)	0.0582	136	964	514	0.533	ギャップ
	TR 2層 $L/D=1$	(-50/50)	0.0813	136	1463	587	0.401	重なり
	TR 2層 $L/D=1$	(-50/50)	0.0813	136	1463	796	0.544	ギャップ

HSX 型の 2 層 $L/D=1$ の試験においてはギャップを許容した場合、重なりを許容した時と比較してロックダウンファクタの低下がみられた。逆に TR 型の 2 層 $L/D=1$ の試験においてはギャップを許容した場合、重なりを許容した時と比較してロックダウンファクタが向上した。

5. 考察

5.1 ひずみゲージの有無による影響

ひずみゲージを貼ることにより、円筒殻の板厚が局所的に厚くなる部分ができ、座屈強度に影響を与える可能性があると考えられた。そのため、実際にひずみゲージを貼った部分の厚さを計測し、瞬間接着剤で貼りつけたときのひずみゲージの厚さを求めた。表 2 に TR 型 2 層 $L/D=1$ の重なり許容の場合のひずみゲージの有無による比較を示す。

表 2 ひずみゲージの有無による比較

供試体名	積層構成	板厚 t [mm]	実測長さ L [mm]	座屈理論値 P_s [N]	実験値 P_a [N]	ロックダウン ファクタ
TR 2層 $L/D=1$ 重なり許容	(-50/50)	0.163	136	1463	587	0.401
TR 2層 $L/D=1$ 重なり許容 (ひずみゲージ無し)	(-50/50)	0.163	136	1463	616	0.421

瞬間接着剤を使用して接着した時のひずみゲージの厚さは約 0.049mm となり、TR 型 2 層の板厚 0.163mm の約 1/3 の値であることがわかる。しかし、ロックダウンファクタを比較しても大きな違いはみられなかった。したがって今回の試験結果からはひずみゲージの有無による影響は大きくないと考えられた。

5.2 各要因による影響

ギャップ/重なりのみならず TR/HSX(材料の違い)、 L/r (長さで半径の比)、 r/t (半径と板厚の比)がノックダウンファクタに及ぼす影響を調べるため今回の試験結果と当研究室の過去のデータを合わせたものに対し回帰分析を行い、各要因が統計的に有意であるかを調べた。表3に回帰分析に使用したデータを示す。また表4にその結果を示す。

ここで各要因は式(1)に示すように線形を仮定しており、ギャップ/重なり及び TR/HSX の効果はダミー変数として評価した。

$$KDF = \overline{KDF} + A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + A_4 X_4 + e \cdots (1)$$

表3 回帰分析に使用したデータ

供試体名	ギャップ/重なり X1	TR/HSX X2	L/r X3	r/t X4	ノックダウンファクタ KDF
TR 6層 $L/r=2$	0	0	1.802	154.752	0.600
TR 6層 $L/r=4$	0	0	3.802	154.752	0.540
TR 6層 $L/r=6$	0	0	5.776	154.752	0.525
HSX 6層 $L/r=2$	0	1	1.805	215.777	0.615
HSX 6層 $L/r=6$	0	1	5.879	215.777	0.578
HSX 3層 $L/r=2$	1	1	1.969	430.553	0.877
HSX 3層 $L/r=6$	1	1	5.893	430.553	0.697
TR 6層 $L/r=2$	1	0	1.802	154.752	0.576
TR 6層 $L/r=6$	1	0	5.776	154.752	0.397
HSX 6層 $L/r=2$	1	1	1.805	215.777	0.491
HSX 6層 $L/r=6$	1	1	5.786	215.777	0.451
HSX 2層 $L/r=2$	1	1	1.811	645.330	0.605
HSX 2層 $L/r=6$	1	1	5.804	645.330	0.492
HSX 2層 $L/r=2$	0	1	1.811	645.330	0.533
TR 2層 $L/r=2$	0	0	1.809	462.255	0.544
TR 2層 $L/r=2$	1	0	1.809	462.255	0.401

表4 回帰方程式の係数推定量とその分数、t値、P値

	係数	標準誤差	t値	P値
定数項	0.588	0.091	6.451	0.0%
ギャップ/重なり X1	-0.021	0.063	-0.338	74.2%
TR/HSX X2	0.102	0.069	1.469	17.0%
L/r X3	-0.017	0.017	-1.013	33.3%
r/t X4	0.000	0.000	-0.285	78.1%

当研究室のこれまでの試験結果からはギャップ/重なりによる影響が大きいと考えていた。しかし回帰分析をおこなった結果、ギャップ/重なりのみならず、TR/HSX, L/r , r/t の有意確率であるP値が5%以上となり、統計的に有意ではない分析結果となった。定数項による影響が大きいのでノックダウンファクタのばらつきにはその他の要因による影響があると考えられる。

6. 結言

今回の試験結果からはひずみゲージの有無による影響は大きくないと考えられた。

回帰分析の結果、ギャップ/重なり、TR/HX, L/r , r/t の効果は統計的には有意ではない分析結果になった。つまりノックダウンファクタのばらつきにはその他の要因による影響があると考えられる。したがって、今後は他の要因(例えば円筒殻が真円であるか否かなどの形状の不正)に着目して実験を追加していくことでデータを蓄積していくことが望まれる。

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) Tsai, Hahn, 複合材料の強度解析と設計入門, 日刊工業新聞社, 1980 年
- 4) 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).
- 5) Takano, A. Simple Closed-Form Solution for the Buckling of Moderately Thick Anisotropic Cylinders, Aerospace Technology of Japan Vol. 10, 2012, pp.17-26, 日本航空宇宙学会
- 6) 岡本瑞希, 宮島侑冬, 高野敦, CFRP 円筒の座屈試験, 宇宙構造材料シンポジウム, ISAS, 2015.