

A03 CFRP 円筒殻の座屈強度

山口裕介 (神奈川大・学), 渡辺光朔 (神奈川大・学), 高野敦 (神奈川大)

Yusuke Yamaguchi, Kousaku Watanabe, 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。当研究室の以前までの研究⁽¹⁾では、積層の重なり/ギャップの有無等に注目したが、ロックダウンファクタ (実験値を理論値で割った軽減係数) に対して影響を及ぼすとは考えにくい結果となった。そこで、今年度研究では、CFRP 円筒殻の形状の初期不整がロックダウンファクタに及ぼす影響を検討した。形状の初期不整を計測するため、円筒度測定器を開発し、表面形状を測定した。また、初期不整をゆるすように製作した CFRP 円筒殻の圧縮座屈試験を行った。形状の初期不整を離散フーリエ変換し、どのような変形成分がロックダウンファクタに影響するかを調べた。

2. CFRP 円筒殻の設計・製作

2.1 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

・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、HSX 型 260.3GPa を用いた。厚さ(実測)は 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

HSX 型は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。初期不整(理想円筒形状からの外れ)が座屈強度に与える影響を調べるため、治具リングの溝の幅を広くし、初期不整をゆるした CFRP 円筒殻を製作した。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、円筒殻試験片を 4 個製作し、それぞれを No.1~4 とした。その結果、表面の形状にばらつきが出るため、円筒度測定器によって実測し、形状の確認を行った。なお、円筒度測定器によって実測する際、円筒殻試験片表面の光沢により、レーザー変位計で測定できなかったため、あらかじめ黒色のスプレーを円筒殻試験片の表面に塗布し、実測した。



図1 溝の幅の広い治具のリング



図2 接着中の様子

3.円筒度測定器の開発

3.1 製作経緯

当研究室の以前までの研究では、積層の重なり/ギャップの有無等に注目したが、ロックダウンファクタに対して影響を及ぼすとは考えにくい結果となった。そこで、CFRP 円筒殻の円筒度を計

測することにより、ロックダウンファクタに及ぼす影響を検討する。一般的な接触方式の測定機では、測定子により形状が変化してしまい薄肉部材の計測に不向きなため、本研究では非接触測定機を開発した。

3.2 装置概要

本計測装置は CFRP 円筒殻をロータリーテーブル上の測定台に設置し、回転させる。また、レーザー変位計を上下方向に移動させることで、各高さ位置での表面形状を測定する。測定・操作はパソコンによって行う。図3に開発した円筒度測定器を示す。

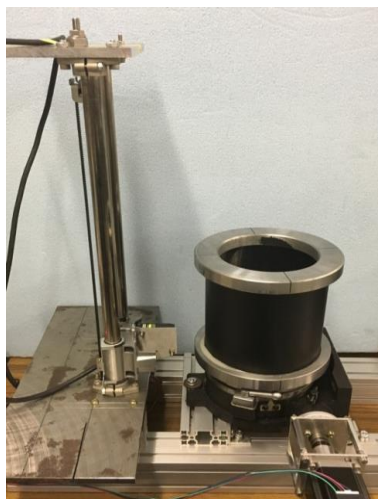


図3 円筒度測定器

表1 仕様

測定可能範囲	388mm(高さ方向)	
レーザー変位計分解能	2μm(60ms時)	
ステッピングモーター駆動	上下方向	1step=0.201mm
	回転方向	1step=0.02°

リニアスライド機構（プリンタを分解し再利用）、ロータリーテーブル、それらを駆動するステップモーター、ドライバ回路、デジタル出力付きデータロガーを購入し製作した。

3.3 測定手順

ロータリーテーブルが6度ごとに回転し、停止時にレーザー変位計により変位を測定する。（これを60点になるまで行う）レーザー変位計が一

定距離だけ上方向に移動し、先ほどの動作を行う。（これを高さ方向10点になるまで行う）

3.4 データ処理

測定したデータは各断面で離散フーリエ変換の式(1)を用いて、直径のふくらみ、剛体移動、楕円成分、…に分解した。各高さ位置での円の形状を確認するため、剛体移動を取り除き、倍率を30倍にしてプロットした。後に圧縮試験を行ったため、試験前後での形状の比較も行った。プロットした図を図4に示す。また、成分のスペクトル解析は、式(2)を用いて行った。スペクトル解析結果を図5に示す。結果、 w_{10} 以降の成分は、ほぼ一定の値になったため、 w_{10} までの成分を回帰分析に使うこととした。

$$w(\theta) = w_0 + w_{1i} \sin \theta + w_{1r} \cos \theta + w_{2i} \sin 2\theta + (1)$$

$$w_{2r} \cos 2\theta \dots + w_{ni} \sin n\theta + w_{nr} \cos n\theta$$

$$w_{nj} = \sqrt{w_{nrj}^2 + w_{nij}^2} \quad (2)$$

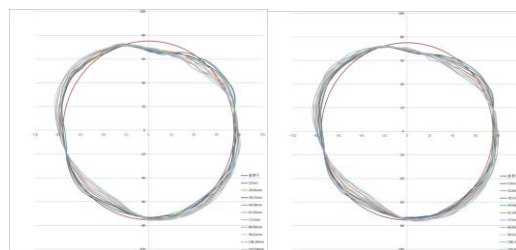


図4 試験片 No.1 プロット図 (圧縮試験前 (左)・圧縮試験後 (右))

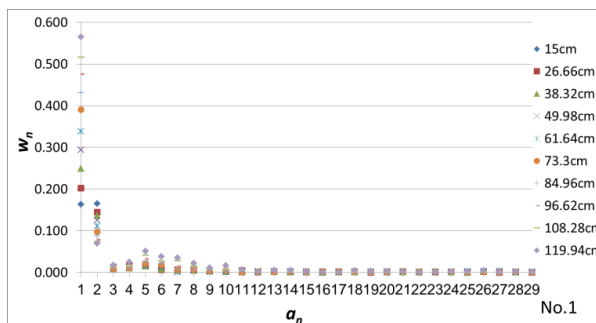


図5 試験片 No.1 スペクトル解析結果

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。鉄板の中心部には鉄球が挿入されており、一点で荷重を負荷できる。また、今年度は位置決め用の治具を新規に製作し、試験機の荷重軸中心と鉄球の間のずれをなくすことを試みた。図6に位置決め用治具を示す。さらに、CFRP 円筒殻に荷重を負荷させた際、上に載せている鉄板の傾きも計測するため4か所にダイヤルゲージを配置した。図7に各ダイヤルゲージの位置を示す。図8に試験機に設置した円筒殻試験片の外観を示す。



図6 位置決め用治具



図8 圧縮試験準備

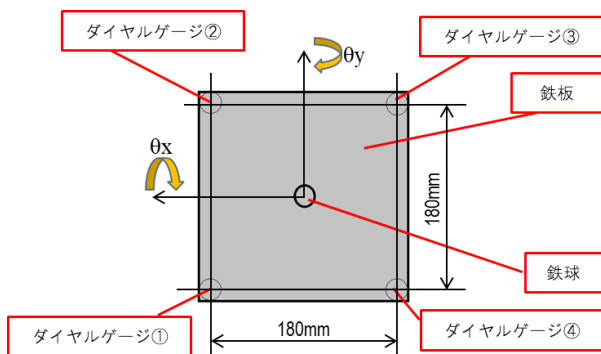


図7 ダイヤルゲージ位置

はじめに、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1.1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 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No.1~4の1回目試験結果を図9~12に示す。図13~16にダイヤルゲージによる鉄板の傾きの測定結果を示す。

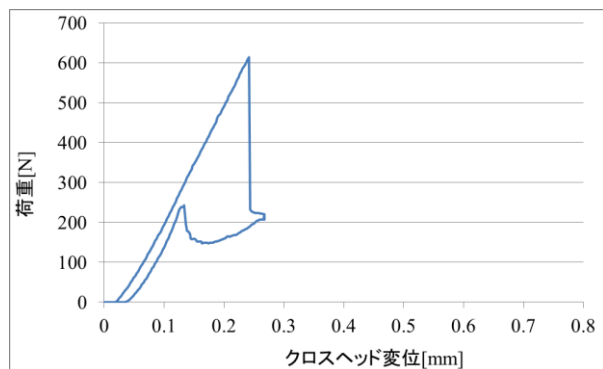


図9 荷重と変位 No.1

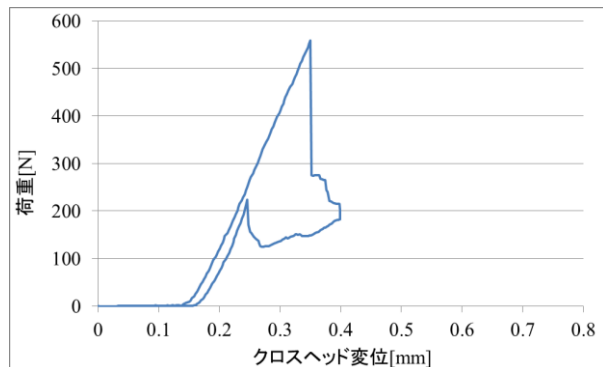


図10 荷重と変位 No.2

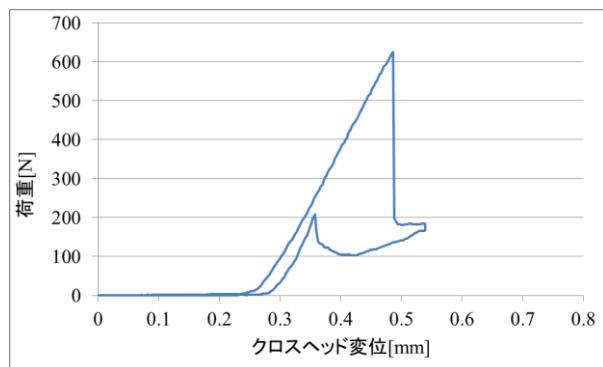


図11 荷重と変位 No.3

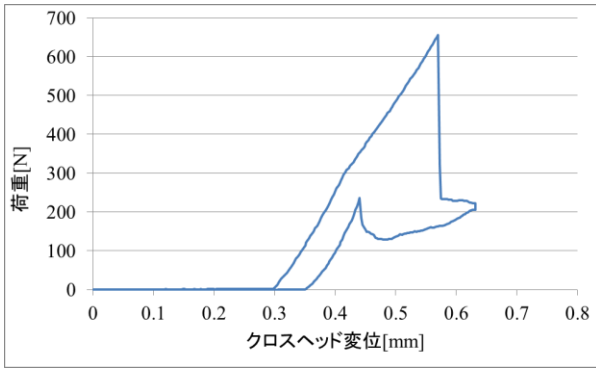


図 12 荷重と変位 No.4

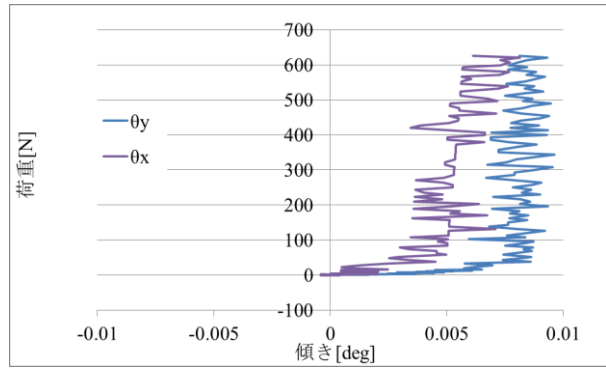


図 16 荷重と鉄板の傾き No.4

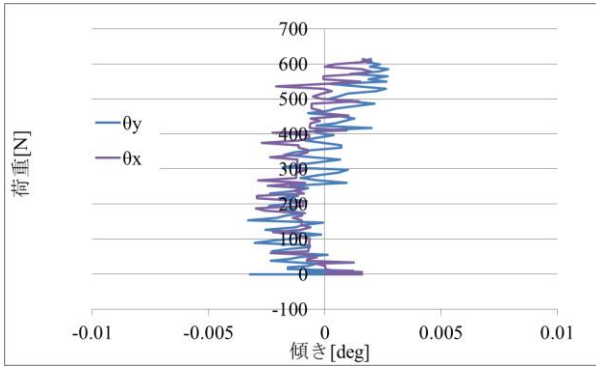


図 13 荷重と鉄板の傾き No.1

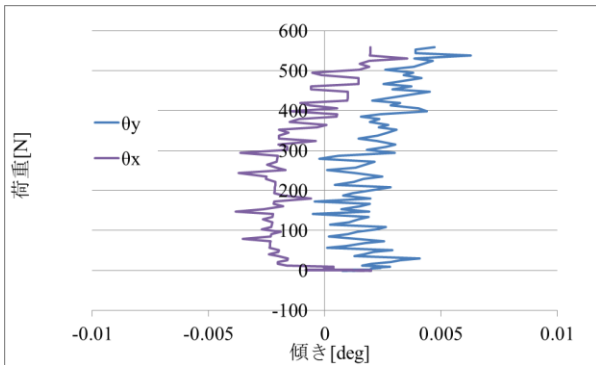


図 14 荷重と鉄板の傾き No.2

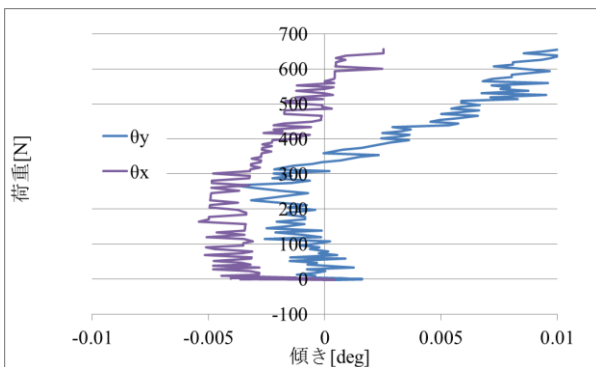


図 15 荷重と鉄板の傾き No.3

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文献⁽¹⁾の試験より得られたもの)を加えたものを表 1 に示す. なお、実験値には鉄板とリングの自重 81.9[N]を加えてある.

表 1 試験結果

試験年度	名称	積層構成	座屈理論値 P_s [N]	楕円成分の振幅(mm)	実験値 P_a [N]	ロックダウンファクタ
2016年度	HSX 2層 L/D=1				514.0	0.511
2017年度	HSX 2層 L/D=1 No.1 (1回目)	(-50/50)	1005		695.1	0.692
	HSX 2層 L/D=1 No.1 (2回目)				700.9	0.697
	HSX 2層 L/D=1 No.1 (3回目)				700.4	0.697
	HSX 2層 L/D=1 No.2 (1回目)				640.9	0.638
	HSX 2層 L/D=1 No.2 (2回目)				639.5	0.636
	HSX 2層 L/D=1 No.2 (3回目)				728.3	0.725
	HSX 2層 L/D=1 No.3 (1回目)				738.1	0.734
	HSX 2層 L/D=1 No.3 (2回目)				754.2	0.750
HSX 2層 L/D=1 No.4 (1回目)	707.8	0.704				
HSX 2層 L/D=1 No.4 (2回目)	698.0	0.694				

HSX 型の 2層 L/D=1 の試験において、実験値は昨年度のものより高い値となった. また、ロックダウンファクタの向上がみられた.

5. 考察

5.1 初期不整による影響

円筒試験片の各成分(直径のふくらみ、剛体移動、楕円成分、...)がロ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に対し単回帰分析を $n=1\sim 10$ まで繰り返し行い、各成分 $n=1\sim 10$ が統計的に有意であるかを調べた. 表 3 に回帰分析結果を示す.

ここで各要因は式(4)に示すように線形を仮定しており、係数 a_n の有意確率 F が小さいほど統計的に有意である. ロックダウンファクタを目的変量、 $w_1 \sim w_{10}$ を説明変量とし、回帰分析を行った. 結果、 w_2 と w_3 の成分に感度があった.

座屈荷重は等方性円筒に関する式(5)より楕円変形が大きいほど小さくなると考えていた。しかし、楕円成分 w_2 に着目して回帰分析を行ったところ、図 18 より楕円変形が大きいほど座屈荷重は大きくなる傾向となった。

$$w_n = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} (w_{nRj}^2 + w_{nIj}^2)} \quad (3)$$

$$KDF = KDF_0 + a_n w_n \quad (4)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{t}{R} \quad (5)$$

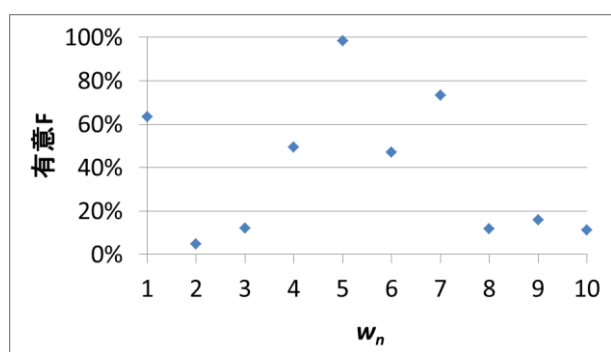


図 17 単回帰分析結果

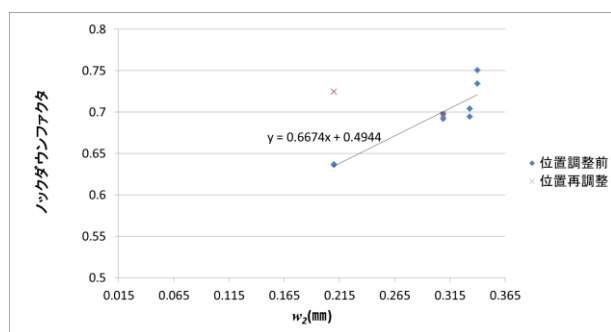


図 18 楕円成分 w_2 単回帰分析結果

5.2 荷重位置再調整による影響

各試験片を 2 回座屈させた後、試験片の No.2 と No.1 の試験片において位置決めが不十分だったことを懸念し、再度試験を行うこととした。そのため、鉄板と治具リングの位置を見直し、再度位置決めを行った。以下に、実験値の 1 回目と 2 回目、再位置決め後の実験値を示す。No.1 はさほど変化は見られなかったものの、No.2 の座屈荷重は変化が見られた。

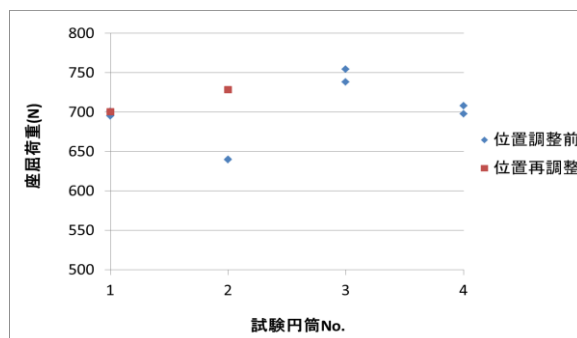


図 19 圧縮試験結果

5.3 位置決めによる影響

新たに製作した位置決め用の治具を使用することで圧縮負荷用治具と鉄球、鉄板の位置決めは精度を上げることができた。鉄板と治具リングの位置決めはマジックによる中心線により目視で行っていた。しかし、鉄板と治具リングの再位置決めにより座屈荷重が上昇するものもあり、鉄板と治具リングの目視の位置決めには限界があることがわかった。

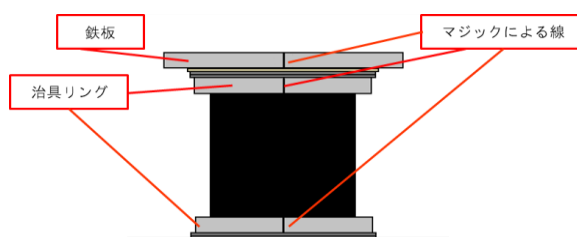


図 20 円筒試験片と鉄板の位置関係図

6. 結言

形状測定後、成分分解を行い回帰分析した結果、楕円成分がロックダウンファクタに与える影響は統計的に有意であった。円変形 w_2 が大きいほど座屈荷重が大きくなる傾向となった。荷重軸と円筒軸のわずかなずれによって、座屈荷重に変化が見られたため、今後位置決め方法を再度検討していく。また、意図的に楕円変形させた円筒殻を数種類製作し、その影響を調べる。

参考文献

- 1) 高野, 伊藤, 鈴木, 高山, 円筒殻の軸圧縮座屈試験, 第 59 回構造強度に関する講演会, 2017.
- 2) 三菱レイヨン パイロフィル部
<https://www.mrc.co.jp/pyrofil/product/pre.html>