

光学的全視野変位計測法を用いた薄肉円筒シェルの座屈挙動の可視化

長崎大学 学生会員 〇川林大祥 長崎大学 正会員 松田浩 長崎大学大学院 学生会員 古屋瞬
長崎大学大学院 学生会員 上妻隼人 長崎大学 非会員 山下務

1. はじめに

円筒シェルは、航空機、各種貯蔵タンク、圧力容器などの広い分野で用いられており、シェルの中でも最も多く用いられているものである。これらの円筒シェルは軸圧縮、曲げ、ねじり、せん断あるいは内外圧などの作用を受け、それらのどの一つの作用によっても、またはどの組合せによっても座屈破壊が生じ得る。それゆえ、これら各種荷重が作用する場合の座屈問題を解明することは座屈強度設計上最重要事項である。

以上に鑑み、本研究ではデジタル画像相関法を用いて、前例が少ない円筒シェルの軸圧縮、およびねじりによる座屈挙動を可視化することを目的とし、座屈前後の周方向の局所的な変形挙動や半径方向変位分布を詳細に調べる。

2. デジタル画像相関法の基本原理

デジタル画像相関法とは、CCD カメラのようなデジタルカメラで解析対象物表面の変形前後の2枚の画像をデジタル的に取り込み、変形前後を比較することで画像全体に渡って変形分布を求めることのできる計測方法である。また、2台のカメラを用いて計測することにより、3次元の変位量、変位方向および形状を求めることができる。さらに、ひずみは移動画素量からひずみゲージ法を用いて算出する。

3. 薄肉円筒シェルの軸圧縮座屈計測

3.1 計測概要

円筒シェルの軸圧縮座屈挙動を非接触全視野で計測するために、デジタル画像相関法を用いて計測を行った。図-1に計測風景を示す。試験片材料には、既製のアルミニウム缶を用いた。弾性係数 $E=70\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ である。円筒シェルの座標系と諸元を図-2と表-1に示す。座標系は点Oを中心とし、 u, v, w は x, y, z 座標に関する座屈時増分変位とし、計測範囲はABCDの半円筒の領域とする。緑端境界条件は、石膏により両端完全固定を実現し、上端に軸方向圧縮力を加えた。



図-1 計測風景

表-1 試験片Aの寸法と諸元

試験片	$R(\text{mm})$	$R_0(\text{mm})$	$H(\text{mm})$	R/H	$L(\text{mm})$	L/R	Z
A	32.935	33.0	0.13	254	33.0	1.0	971

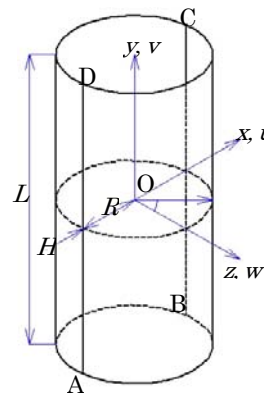


図-2 円筒シェルの座標系と諸元

R : 円筒の平均半径(mm)

R_0 : 円筒の外半径(mm)

L : 円筒の長さ(mm)

H : シェル厚さ(mm)

x, y, z : 直交座標系

u, v, w : 座屈時増分変位

R, θ, y : 円筒座標

$Z = \sqrt{1-\nu^2} \frac{L^2}{RH}$: 形状係数

3.2 軸圧縮座屈計測結果

試験片Aを用いて軸圧縮座屈実験を行った結果を示す。図-3に荷重-変位曲線、図-4に座屈形態を示す。また、図-5には座屈直前および座屈直後の半径方向変位分布図を示す。

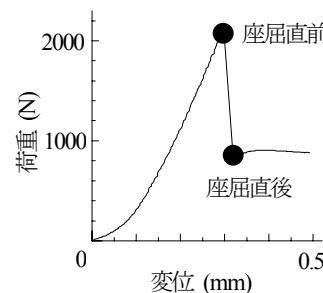


図-3 荷重-変位曲線

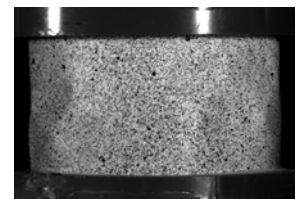


図-4 座屈形態

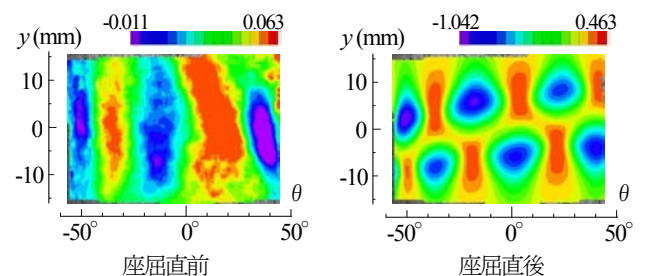


図-5 半径方向変位分布図

$\theta=30^\circ, 0^\circ, 30^\circ$ の位置での軸方向たわみ波形を図-6に、 $y=-5.5\text{mm}, y=0\text{mm}, y=5.5\text{mm}$ の位置での周方向のたわみ波形を図-7に示す。

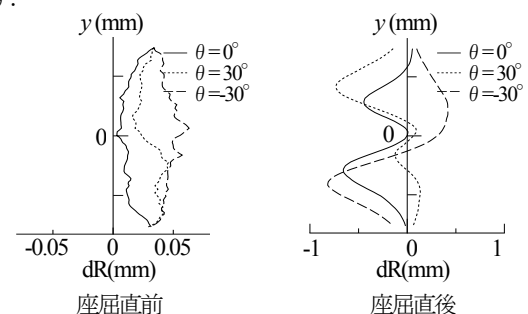


図-6 軸方向たわみ波形

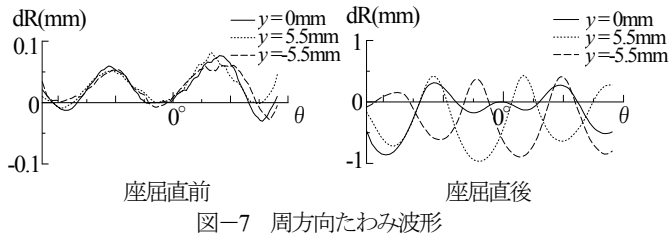


図-7 周方向たわみ波形

代表的な Weingarten らの実験値を踏まえた NASA の座屈評価式を式(1)に示す。

$$\sigma_{a,cr}^e = 0.6E \frac{H}{R} \left[1 - 0.901 \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\sqrt{R/H}}{16} \right) \right\} \right] \quad (1)$$

(100 ≤ R/H ≤ 4000, 0.5 ≤ L/R ≤ 5.0)

本実験の座屈荷重が 2119.6N, それに対し NASA 式による座屈荷重は 1982.6N であり, 誤差 6.9% となった。NASA 式は実験の下限值から算出された式であり, 本実験はそれを満足する結果となった。

図-5 の座屈直後の半径方向変位分布図を観察すると, 周方向と軸方向の長さがほぼ等しいダイヤモンド型座屈の変形分布をしっかりと捉えていることが確認できる。しかし座屈直前は, 軸方向に長い波長(半波数 $j=1$)の変位モード成分が卓越している。この座屈直前と座屈直後の変位分布形状の相違は, 図-6 の座屈直前の軸方向たわみ波形からも確認できる。それに対し, 図-7 の周方向たわみ波形を観察すると, 座屈直前の周方向たわみ波形の波長・波数に依存し, ダイヤモンド型座屈が発生していることが確認できる。

4. 薄肉円筒シェルのねじり座屈計測

4.1 計測概要

薄肉円筒シェルのねじり座屈を可視化するために, デジタル画像相関法を用い, ねじり試験を行った。試験片材料には, 軸圧縮座屈試験片と同様の既製のアルミニウム缶を用い, 円筒長さ $L=86\text{mm}$ とした。試験片 B の諸元を表-2 に示す。

表-2 試験片 B の寸法と諸元

試験片	R(mm)	R ₀ (mm)	H(mm)	R/H	L(mm)	L/R	Z
B	32.935	33.0	0.13	254	86.0	2.6	1647

縁端境界条件は両端完全固定とし, 石膏の中にボルトを埋め込むことで完全固定を実現した。図-8 に, 作製した専用の固定ジグ・およびねじり試験機の写真を示す。図-9 に示すように, ジグ上部に巻き付けたワイヤを万能試験機で引張り, その引張力を傘歯車によってねじり力に変えた。



図-8 固定ジグ・ねじり試験機



図-9 力の変換

4.2 ねじり座屈計測結果

試験片 B を用いてねじり座屈実験を行った結果を示す。図-10

に荷重-変位曲線, 図-11 に座屈形態を示す。また, 図-12 には座屈直前および座屈直後の半径方向変位分布図を示す。

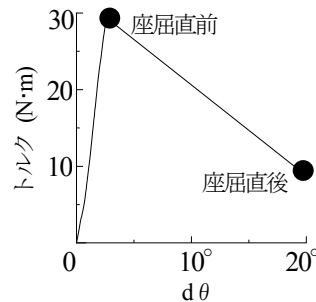


図-10 T-dθ 曲線



図-11 座屈形態

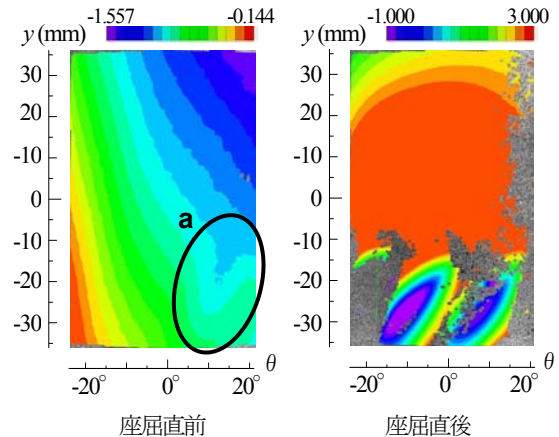


図-12 半径方向変位分布

図-11 に示すとおり, 試験片下部にねじり座屈が生じた。図-12 の座屈直前の半径方向変位分布を観察すると, a の箇所ねじり座屈の前兆と思われる若干の変位集中が確認できる。座屈直後の半径方向変位分布を見ても, その変位集中の場所からねじり座屈が生じていることがわかる。円筒シェルのねじりが作用する場合には, 一般には初期不整の影響はあまり大きくなく, 座屈後大幅に強度が低下しないとされているが, 図-10 に示すとおり突発的なねじり座屈が生じた。これは我々が作製した固定ジグが軸方向も拘束していたためであり, 改善の必要がある。今後は, 固定ジグを改良し, 円筒シェルの流動的なねじり座屈挙動を可視化していく予定である。

5. まとめ

デジタル画像相関法を用いることにより, 円筒シェルの 3 次元変形計測が可能であり, 円筒シェルの軸圧縮およびねじりによる座屈挙動を, 非接触全視野で捉えることができた。また, 薄肉円筒シェル特有の軸圧縮座屈形態を計測することができ, それは周方向の変位が先行し, ダイヤモンド型座屈を起こす要因となっていることがわかった。

参考文献

- (1) 社団法人日本機械学会編：シェルの振動と座屈ハンドブック, 技法堂出版, 2002
- (2) 社団法人土木学会 鋼構造委員会, 座屈背系ガイドライン[2005 年改訂版], 報光社, 2005
- (3) 山田聖志, 機械の研究-シェルの振動と座屈の基礎(座屈編), 2007