

デジタル画像相関法を用いた薄肉円筒シェルのダイヤモンド型座屈の可視化

長崎大学 学生会員 ○上妻隼人

長崎大学大学院 非会員 趙 程

長崎大学大学院 学生会員 古屋瞬

長崎大学

正会員 松田浩

長崎大学

非会員 山下務

1. はじめに

円筒シェルは、貯蔵庫、圧力容器、航空機など広い分野で用いられているが、軸圧縮、曲げ、せん断、ねじりなどの各種荷重が作用する下で生じる座屈問題を解明することは構造物の強度設計上最重要事項であり、これまでに多くの研究がなされてきた。例えば、薄肉シェル構造物の座屈強度評価上、最も基本的な円筒シェルの軸圧縮座屈強度は種々の境界条件の下で八巻ら⁽¹⁾により明かされている。また、円筒シェルの座屈は断面の形状変化を伴い、その現れ方には、厚肉、薄肉、内圧荷重、長さなどの要因により、非常に多くの様式がある。本研究では、デジタル画像相関法を用いて軸圧縮力を受ける薄肉円筒シェルの載荷実験を行い、前例が少ないダイヤモンド型座屈挙動の全視野計測を実施する。さらに、薄肉円筒シェルの弾性および弾塑性座屈挙動を座屈前後の変位・ひずみに注目し、古典理論の座屈強度と実験値との比較、検討を目的としている。

2. デジタル画像相関法の基本原理

デジタル画像相関法⁽²⁾とは、CCDカメラのようなデジタルカメラで対象物表面の変形前後の画像をデジタル的に取り込み、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の原理を用いて算出する。

3. 円筒シェルの座屈計測

3.1 計測概要

薄肉円筒シェルの座屈挙動を非接触全視野で計測するため、デジタル画像相関法を用いて計測を行った。写真-1に計測風景を示す。

試験片には、長さ L が異なる二種類の既成アルミニウム缶の薄肉円筒シェルを用いた。弾性係数 $E=70\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ である。各試験片寸法を表-1に示す。

表-1 各試験片寸法

試験片	$R(\text{mm})$	$H(\text{mm})$	R/H	$L(\text{mm})$	L/R	Z
A	32.935	0.131	-251	66	2	963
B				99	3	2167

形状計測の有用性を確認するために初期状態の薄肉円筒シェル平均外半径 R_0 をノギスでの実測値とデジタル画像相関法での計測値を比較し、その結果を表-2に示す。両者の値はよく一致しており、形状計測の有用性が確認できた。

表-2 円筒シェル平均外半径 R_0 の計測値と実測値と誤差

試験片	計測値(mm)	実測値(mm)	誤差(%)
A	33.006826	33	0.02
B	32.990065	33	0.03

円筒シェルの座標系と試験片諸元を図-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 $ABCD$ の領域とする。縁端境界条件は、試験片 A, B 共に両端完全固定とし、上端に変位量制御で 0.1mm/min の軸方向圧縮を加え、 1回/sec の速さで画像及び荷重-変位データを取得した。

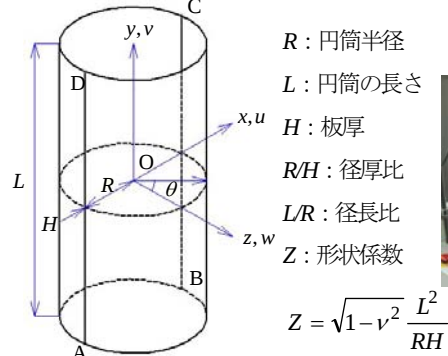


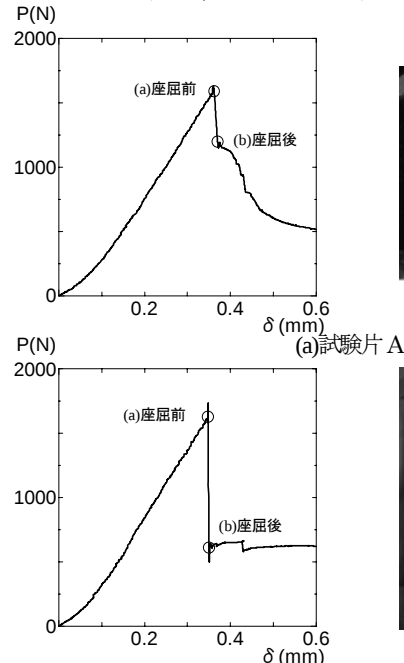
図-1 円筒シェルの座標系と諸元



写真-1 計測風景

3.2 薄肉円筒シェルの座屈計測結果

試験片 A, B を用いて軸圧縮座屈実験を行った結果を図-2に示す。図-2(1), (2)に示すように、各試験片は座屈分岐点で薄肉円筒シェル特有の座屈形態であるダイヤモンド型座屈を起こし、急激に荷重が減少して座屈後の釣合い状態に飛び移っている。また、試験片 A の周方向座屈波数は8、軸方向座屈波数は1で、試験片 B では周方向座屈波数は8、軸方向座屈波数は2と軸方向のみ異なった。



(1)荷重-変位曲線 (2)座屈直後の座屈形態

図-2 各試験片の荷重-変位曲線と座屈形態

図-3にはデジタル画像相関法により得られた試験片 A, B の初期状態と座屈後の形状計測結果を yz, xyz 座標系で示す。

キーワード デジタル画像相関法、光計測、非接触計測、円筒シェル、ダイヤモンド型座屈

連絡先 〒852-8521 長崎県長崎市文教町1番14号 TEL&FAX:095-819-2590

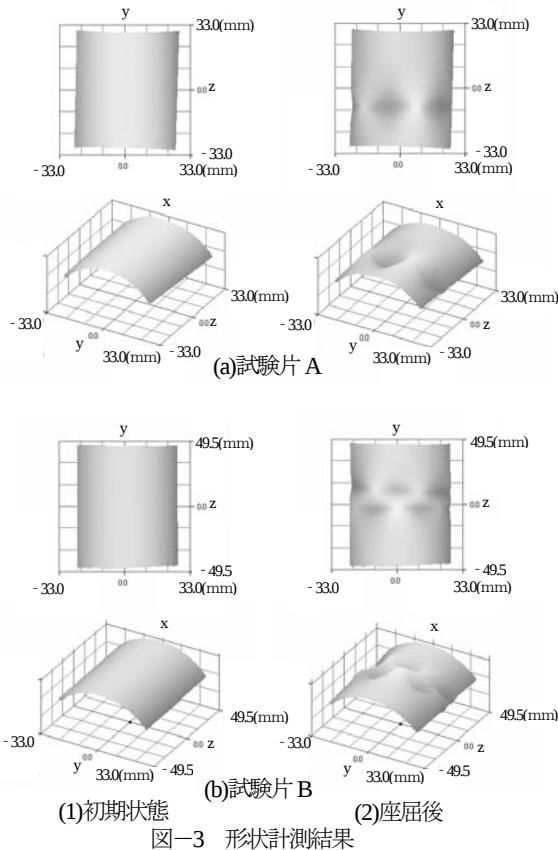
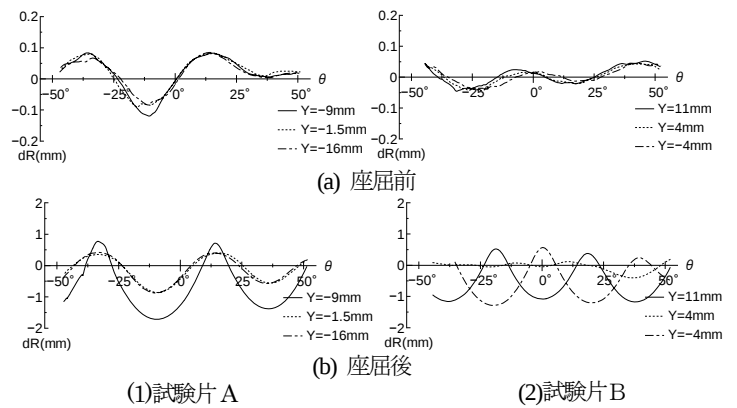
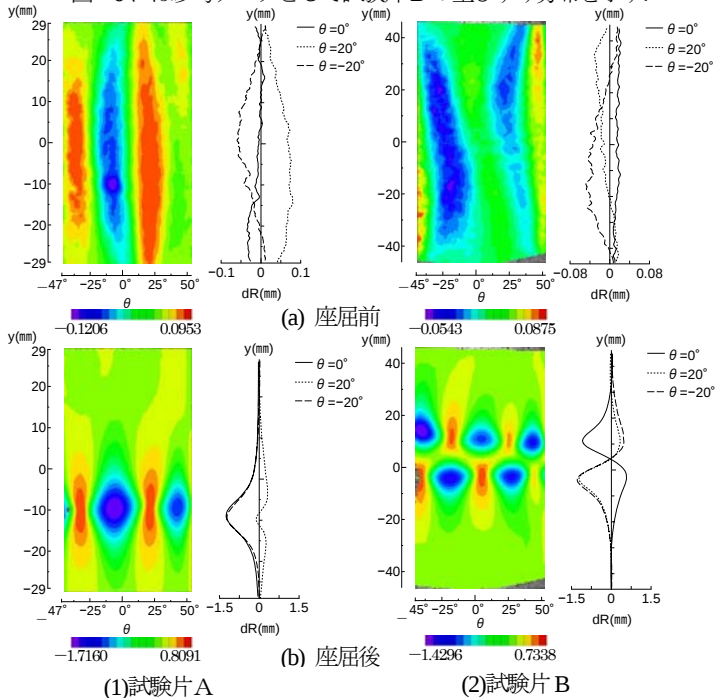


図-4 にデジタル画像相関法を用いて計測した各試験片の座屈前後の変位分布と $\theta = -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ$ の位置での軸方向たわみ波形を、図-5 には試験片 A は $y = -9\text{mm}, -1.5\text{mm}, -16\text{mm}$ 、試験片 B は $y = 11\text{mm}, 4\text{mm}, -4\text{mm}$ の位置での周方向たわみ波形を示す。図-4 の軸方向たわみ波形より、座屈前後の挙動はまったく異なっていることがわかる。しかし、図-5 の周方向たわみ波形では座屈前後のたわみ挙動に明らかな相関が見られる。よって、周方向のたわみがダイヤモンド型座屈を起こす要因となっていると考えられる。

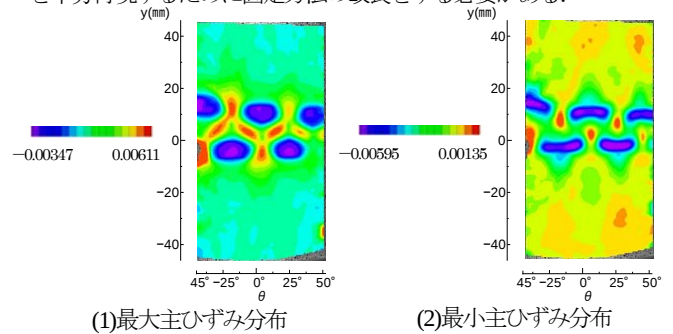
図-6 には参考データとして試験片 B の主ひずみ分布を示す。



ここで、円筒シェルの古典弾性座屈荷重 P_{cl} は式(1)で表される。

$$P_{cl} = \frac{2\pi E H^2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} = 4568[\text{N}] \quad (1)$$

実験で計測された座屈荷重 P は試験片 A で 1590N、試験片 B で 1626N であり、古典理論値に対して約 1/3 となる。八巻ら⁹⁾によって明らかにされている解析理論では、古典理論値よりも座屈荷重が 8 ~ 15% の間で減少するものであり、大きな誤差が生じた。この原因としては、製造過程を問わず、現実には製作された薄肉シェルには必ず形状の不完全性や残留応力などの初期不正が存在するため、その影響が大きいと考えられ、また、縁端部境界条件の完全固定が十分再現されていないなどが考えられる。さらに、一般的に弾性座屈が発生するのは径厚比 R/H が 400 以上の時と言われているのに対して、本試験片は 251 であり、純粋な弾性座屈ではなかったと予想できる。今後は、板厚に比べて円筒半径の大きい円筒を用いて、より弾性座屈問題に近づく実験を行う必要があり、また完全固定を十分再現するために固定方法の改良をする必要がある。



4. まとめ

デジタル画像相関法により、従来の計測方法では不可能であった軸圧縮を受ける薄肉円筒シェルの非接触全視野 3 次元変位・ひずみ計測が可能である。また、3 次元形状計測の性能照査も同時に行い、高精度であることが確認できた。さらに、薄肉円筒シェル特有のダイヤモンド型の座屈挙動を全視野計測し、座屈前後を比較することによって周方向の変位(たわみ)が先行・進展し、ダイヤモンド型座屈を起こす要因となっていることが確認できた。

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) デジタル画像相関法, 実験力学, Journal of JSEM Vol.3 No.2, pp59-62, 日本実験力学会, 2003.